

TRABAJO DE FIN DE GRADO

Grado de Ingeniería Mecánica

ANÁLISIS DINÁMICO Y CONTROL AUTOMÁTICO DEL MECANISMO LEVA-VÁLVULA DEL MOTOR



Memoria

Autor:	Núria Riera Lorton
Director:	Leonardo Acho Zuppa
Co-Director:	Amelia Nápoles
Ponente:	--
Convocatoria:	Enero 2018



Resum

El present Treball de Fi de Grau (TFG) té com objectiu principal desenvolupar el disseny d'una maqueta experimental del mecanisme d'apertura i tancament de les vàlvules de motors de combustió interna, concretament el de la culata d'una furgoneta.

Un cop establerta la maqueta, es realitzaran assajos de possibles fallides dels seus components, fent èmfasi en el desgast de les molles.

Es plantejarà un procediment matemàtic per la detecció de fallides previsibles gràcies a l'extracció de dades a través d'un model de referència.

Finalment s'ha optat per obtenir els valors mitjançant simulacions amb el programa *SolidWorks* per validar la proposta.

Resumen

El presente Trabajo de Fin de Grado (TFG) tiene como objetivo principal desarrollar el diseño de una maqueta experimental del mecanismo de apertura y cierre de válvulas de motores de combustión interna, concretamente el de la culata de una furgoneta.

Una vez establecida la maqueta se realizarán ensayos de posibles fallos de sus componentes, haciendo hincapié en el desgaste de los muelles.

Seguidamente, se planteará un procedimiento matemático para la detección de fallos previsibles gracias a la extracción de los datos a través de un modelo de referencia.

Finalmente se ha optado por obtener los resultados mediante simulaciones con el programa *SolidWorks* para validar la propuesta.

Abstract

Main objective of the current work, consists to develop the design of an experimental mockup regarding the main mechanism of poppet valves, controlling their work cycle in an internal combustion engine, more precisely the cylinder head of a real van.

Once the mockup has been established tests will be performed in the components, provoking fails in the components, focusing mainly on the spring attrition.

Afterward, a mathematical procedure will be proposed in order to detect system failures with the data extracted from the reference model.

Finally, in order to obtain the data, simulations will be done with SolidWorks in order to extract the main data.

Agradecimientos

Este trabajo no se hubiera podido realizar de no ser por el apoyo constantes de mi familia, concretamente de Josep Riera Malet y Catherine Lorton, mis padres y de Ricardo Monteiro Pereira, mi pareja.

Agradezco enormemente a mi co-directora Amelia Nápoles por proponerme el proyecto y a mi director Leonardo Acho por su apoyo durante todo el trabajo.

También agradezco a los ingenieros de la Oficina Técnica de la empresa IBERITAL, donde he realizado prácticas extracurriculares, Francisco García, Daniel Debón y Jordi Gay por sus ideas y sugerencias.

Índice

RESUM	2
RESUMEN	3
ABSTRACT	4
AGRADECIMIENTOS	5
PREFACIO	14
1.1. Origen del trabajo	14
1.2. Motivación	14
1.3. Requerimientos previos.....	15
2. INTRODUCCIÓN	17
2.1. Objetivo general del trabajo	17
2.2. Objetivos específicos del proyecto	17
2.3. Alcance del trabajo	18
3. CAPÍTULO	19
3.1. Introducción a los motores de combustión interna y sus componentes.	19
3.1.1. ¿Qué es un motor de combustión interna?	19
3.1.2. Componentes Principales.....	20
3.1.3. Funcionamiento.....	26
3.2. Desarrollo esquemático de una maqueta experimental para la detección de posibles fallos en fatigas del muelle principal en el mecanismo de apertura y cierre de una válvula en motores de combustión interna.....	29
3.2.1. Estudio previo.....	29
3.2.2. Desarrollo del prototipo	32
3.2.3. Presentación de los Componentes, Subensamblajes y Ensamblajes	34
3.2.4. Ensamblaje.....	46
3.2.5. Codificación del proyecto	48
3.2.6. Materiales, Procesos de Fabricación y Tratamientos Térmicos.	52
3.2.7. Realidad de la situación.....	60
3.3. Elaboración de un modelo dinámico simplificado al mecanismo de apertura y cierre de una válvula en motores de combustión interna	63
3.3.1. Simulaciones <i>Motion</i> Maqueta	63
3.3.2. Elaboración de un Modelo Simple	65

3.3.3. Procesado de señales.....	69
3.4. Diseño de un modelo matemático explicativo de fatigas en muelles.....	82
3.4.1. Explicación del Diseño del Modelo Matemático	82
3.4.2. Aplicación del Diseño del Modelo Matemático del caso simulado por <i>Motion</i> ..	96
ANÁLISIS DEL IMPACTO AMBIENTAL	100
CONCLUSIONES	103
PRESUPUESTO	105
BIBLIOGRAFIA	108

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 3-1 PISTÓN (FUENTE: HANDBOOK).....	20
FIGURA 3-2 BIELA (FUENTE: HANDBOOK).....	21
FIGURA 3-3 CILINDRO (FUENTE: GASGAS.COM).....	21
FIGURA 3-4 BLOQUE DEL MOTOR (FUENTE: AFICIONADOSALAMECANICA.NET).....	21
FIGURA 3-5 CÁRTER (FUENTE: INTEREMPRESAS.NET).....	22
FIGURA 3-6 CULATA (FUENTE: RO-DES.COM).....	22
FIGURA 3-7 CIGÜEÑAL (FUENTE: MECANICAYMOTORES.COM)	23
FIGURA 3-8 DISTRIBUCIÓN (FUENTE: AFICIONADOSALAMECANICA.NET).....	23
FIGURA 3-9 CORREA Y POLEAS DE DISTRIBUCIÓN (FUENTE: AUTOMOTORYVENTAS.COM)	24
FIGURA 3-10 ÁRBOL DE LEVAS (FUENTE: IMAGEN PROPIA).....	24
FIGURA 3-11 BALANCÍN (FUENTE: IMAGEN PROPIA)	24
FIGURA 3-12 VÁLVULA DE ADMISIÓN (FUENTE: IMAGEN PROPIA)	25
FIGURA 3-13 MOTOR DE DOS TIEMPOS (FUENTE: PSICODELICIA7.FILES.WORDPRESS.COM)	26
FIGURA 3-14 ETAPAS DE UN MOTOR DE CUATRO TIEMPOS (FUENTE: MECANICAYMOTORES.COM)	28
FIGURA 3-15 CULATA DE UNA FURGONETA MERCEDES-BENZ DEL LABORATORIO DE MECÁNICA (FUENTE: FOTOGRAFÍA PROPIA)	30
FIGURA 3-16 ESTUDIO INICIAL SISTEMA (FUENTE: ELEMENTO PROPIO).....	30
FIGURA 3-17 PIEZAS DISPONIBLES PARA EL PROTOTIPO (FUENTE: FOTOGRAFÍA PROPIA).....	32
FIGURA 3-18 EXTRACCIÓN DE PIEZAS DEL MODELO (FUENTE: FOTOGRAFÍA PROPIA)	32
FIGURA 3-19 BANCADA MODELIZADA CON SOLIDWORKS (FUENTE: IMAGEN PROPIA).....	34
FIGURA 3-20 VÁLVULA DE ADMISIÓN REAL DISPONIBLE (FUENTE: IMAGEN PROPIA).....	35
FIGURA 3-21 ENSAMBLAJE COMPLETO DE LA VÁLVULA DE ADMISIÓN MODELIZADA (FUENTE: IMAGEN PROPIA)	35
FIGURA 3-22 VÁSTAGO DE ADMISIÓN MODELIZADO (FUENTE: IMAGEN PROPIA).....	36
FIGURA 3-23 MUELLE DE ADMISIÓN MODELIZADO (FUENTE: IMAGEN PROPIA)	36
FIGURA 3-24 TUERCA DE ADMISIÓN MODELIZADO (FUENTE: IMAGEN PROPIA).....	36
FIGURA 3-25 SOPORTE VÁLVULA-MUELLE DE ADMISIÓN MODELIZADO (FUENTE: IMAGEN PROPIA).....	36
FIGURA 3-26 TAPÓN DE ADMISIÓN MODELIZADO (FUENTE: IMAGEN PROPIA)	36
FIGURA 3-27 VÁLVULA DE ESCAPE REAL DISPONIBLE (FUENTE: IMAGEN PROPIA).....	37
FIGURA 3-28 ENSAMBLAJE COMPLETO DE LA VÁLVULA DE ESCAPE MODELIZADA (FUENTE: IMAGEN PROPIA)	37
FIGURA 3-29 VÁSTAGO DE ESCAPE MODELIZADO (FUENTE: IMAGEN PROPIA).....	38
FIGURA 3-30 MUELLE DE ESCAPE MODELIZADO (FUENTE: IMAGEN PROPIA)	38
FIGURA 3-31 TUERCA DE ESCAPE MODELIZADO (FUENTE: IMAGEN PROPIA).....	38
FIGURA 3-32 SOPORTE VÁLVULA-MUELLE DE ESCAPE MODELIZADO (FUENTE: IMAGEN PROPIA).....	38
FIGURA 3-33 TAPÓN DE ESCAPE MODELIZADO (FUENTE: IMAGEN PROPIA)	38
FIGURA 3-34 BALANCÍN COMPLETO REAL DISPONIBLE (FUENTE: IMAGEN PROPIA).....	39
FIGURA 3-35 ENSAMBLAJE COMPLETO DEL BALANCÍN MODELIZADO (FUENTE: IMAGEN PROPIA)	39
FIGURA 3-36 BALANCÍN MODELIZADO (FUENTE: IMAGEN PROPIA).....	40
FIGURA 3-37 EJE DE SUJECIÓN DEL BALANCÍN MODELIZADO (FUENTE: IMAGEN PROPIA)	40

FIGURA 3-38 SUJECCIÓN DEL BALANCÍN MODELIZADO (FUENTE: IMAGEN PROPIA)	40
FIGURA 3-39 SUPORTE DEL BALANCÍN MODELIZADO (FUENTE:	40
FIGURA 3-40 TORNILLO SUJECTOR DEL SOPORTE DEL BALANCÍN MODELIZADO (FUENTE: IMAGEN PROPIA)....	40
FIGURA 3-41 ÁRBOL DE LEVAS REAL DISPONIBLE (FUENTE: IMAGEN PROPIA).....	41
FIGURA 3-42 ÁRBOL DE LEVAS MODELIZADO (FUENTE: IMAGEN PROPIA).....	41
FIGURA 3-43 CORREA MODELIZADA (FUENTE: IMAGEN PROPIA	41
FIGURA 3-44 POLEA MODELIZADA (FUENTE: IMAGEN PROPIA.....	41
FIGURA 3-45 SOPORTE DEL ÁRBOL DE LEVAS A LA BANCADA (FUENTE: IMAGEN PROPIA.....	42
FIGURA 3-46 SOPORTE DEL MOTOR A LA BANCADA (FUENTE: IMAGEN PROPIA).....	42
FIGURA 3-47 MOTOR REAL DISPONIBLE (FUENTE: IMAGEN PROPIA)	42
FIGURA 3-48 ENSAMBLAJE COMPLETO DEL MOTOR MODELIZADO (FUENTE: IMAGEN PROPIA).....	42
FIGURA 3-49 PIEZA TRASERA DEL MOTOR MODELIZADO (FUENTE: IMAGEN PROPIA)	43
FIGURA 3-50 PIEZA DELANTERA DEL MOTOR MODELIZADO (FUENTE: IMAGEN PROPIA)	43
FIGURA 3-51 PIEZA CENTRAL DEL MOTOR MODELIZADO (FUENTE: IMAGEN PROPIA)	43
FIGURA 3-52 BOBINA Y EJE DEL MOTOR MODELIZADO (FUENTE: IMAGEN PROPIA)	43
FIGURA 3-53 POLEA DEL MOTOR MODELIZADO (FUENTE: IMAGEN PROPIA)	43
FIGURA 3-54 TAPA DE LA POLEA DEL MOTOR MODELIZADO (FUENTE: IMAGEN PROPIA).....	43
FIGURA 3-55 SOPORTE REGLETA DEL MOTOR MODELIZADO (FUENTE: IMAGEN PROPIA)	44
FIGURA 3-56 REGLETA DEL MOTOR MODELIZADO (FUENTE: IMAGEN PROPIA).....	44
FIGURA 3-57 TORNILLO INTERNO DEL MOTOR MODELIZADO (FUENTE: IMAGEN PROPIA).....	44
FIGURA 3-58 ARANDELA INTERNA DEL MOTOR MODELIZADO (FUENTE: IMAGEN PROPIA).....	44
FIGURA 3-59 TUERCA MODELIZADA A (FUENTE: IMAGEN PROPIA)	45
FIGURA 3-60 TUERCA MODELIZADA B (FUENTE: IMAGEN PROPIA)	45
FIGURA 3-61 TORNILLO MODELIZADO A (FUENTE: IMAGEN PROPIA).....	45
FIGURA 3-62 TORNILLO MODELIZADO B (FUENTE: IMAGEN PROPIA).....	45
FIGURA 3-63 TUERCA MODELIZADA C (FUENTE: IMAGEN PROPIA)	45
FIGURA 3-64 ENSAMBLAJE VITUAL DE LA MAQUETA	46
FIGURA 3-65 DETALLE 1 DE LA MAQUETA VIRTUAL.....	46
FIGURA 3-66 DETALLE 2 DE LA MAQUETA VIRTUAL.....	47
FIGURA 3-67 DETALLE 3 DE LA MAQUETA VIRTUAL.....	47
FIGURA 3-68 PROBLEMÁTICA DEL BALANCÍN CON EL ÁRBOL DE LEVAS (FUENTE: FOTOGRAFÍA PROPIA).....	61
FIGURA 3-69 VELOCIDAD DE GIRO DEL MOTOR (FUENTE: FOTOGRAFÍA PROPIA)	63
FIGURA 3-70 VELOCIDAD DE GIRO DEL MOTOR (FUENTE: FOTOGRAFÍA PROPIA)	64
FIGURA 3-71 VELOCIDAD DE GIRO DEL ÁRBOL DE LEVAS (FUENTE: FOTOGRAFÍA PROPIA)+	64
FIGURA 3-72 MODELO SIMPLE (FUENTE: FOTOGRAFÍA PROPIA)	65
FIGURA 3-73 INTERFAZ MOTION CON MODELO SIMPLE.....	65
FIGURA 3-74 DETALLE INTERFAZ MODELO SIMPLE (FUENTE: FOTOGRAFÍA PROPIA).....	66
FIGURA 3-75 DETALLE 2 INTERFAZ MODELO SIMPLE (FUENTE: FOTOGRAFÍA PROPIA).....	66
FIGURA 3-76 PARÁMETROS MOTION.....	67
FIGURA 3-77 SEÑAL OPTIMIZADA DEL MODELO SIMPLE (FUENTE: FOTOGRAFÍA PROPIA).....	67
FIGURA 3-78 DETALLE 1 INTERFAZ MODELO SIMPLE CON OPTMIZACIÓN(FUENTE: FOTOGRAFÍA PROPIA)	68

FIGURA 3-79 DETALLE 2 INTERFAZ MODELO SIMPLE CON OPTIMIZACIÓN(FUENTE: FOTOGRAFÍA PROPIA).....	68
FIGURA 3-80 DETALLE 3 INTERFAZ MODELO SIMPLE CON OPTIMIZACIÓN(FUENTE: FOTOGRAFÍA PROPIA).....	68
FIGURA 3-81 SEÑALES DEL MODELO SIMPLE (FUENTE: FOTOGRAFÍA PROPIA)	69
FIGURA 3-82 GRÁFICO SEÑAL IDEAL (FUENTE: FOTOGRAFÍA PROPIA)	70
FIGURA 3-83 GRÁFICO TIEMPO-DESPLAZAMIENTO OBTENIDO POR MOTION EN .CVS (FUENTE: FOTOGRAFÍA PROPIA)	74
FIGURA 3-84 GRÁFICO ANGULO-DESPLAZAMIENTO OBTENIDO POR MOTION EN .CVS (FUENTE: FOTOGRAFÍA PROPIA)	75
FIGURA 3-85 VALORES INTERPOLADOS (FUENTE: FOTOGRAFÍA PROPIA)	78
FIGURA 3-86 EXPLICACIÓN DEL DESFASE DEL EJE Y.....	78
FIGURA 3-87 GRÁFICO DE LOS VALORES AJUSTADOS (FUENTE: FOTOGRAFÍA PROPIA)	81
FIGURA 3-88 ESQUEMA DEL DISEÑO DEL MODELO MATEMÁTICO (FUENTE: FOTOGRAFÍA PROPIA).....	82
FIGURA 3-89 EXPLICACIÓN AMPLITUD Y BIAS (FUENTE: FOTOGRAFÍA PROPIA)	84
FIGURA 3-90 PARÁMETROS DEL MOTOR (FUENTE: FOTOGRAFÍA PROPIA).....	85
FIGURA 3-91 PARÁMETROS DEL MOTOR (FUENTE: FOTOGRAFÍA PROPIA).....	85
FIGURA 3-92 XY GRAPH (FUENTE: FOTOGRAFÍA PROPIA)	86
FIGURA 3-93 EXPLICACIÓN FUERZAS LEVA-BALANCÍN (CAM DESIGN II – UNIVERSIDAD CARLOS III)	87
FIGURA 3-94 GAIN (FUENTE: FOTOGRAFÍA PROPIA)	88
FIGURA 3-95 MODELO VÁLVULA DINÁMICA (FUENTE: FOTOGRAFÍA PROPIA)	89
FIGURA 3-96 BAND-LIMITED WHITE NOISE (FUENTE: FOTOGRAFÍA PROPIA)	90
FIGURA 3-97 REPEATING SEQUENCE (FUENTE: FOTOGRAFÍA PROPIA)	91
FIGURA 3-98 SCOPE (FUENTE: FOTOGRAFÍA PROPIA)	92
FIGURA 3-99 ZOOM SCOPE (FUENTE: FOTOGRAFÍA PROPIA)	92
FIGURA 3-100 MODELO O ESTIMADOR K (FUENTE: FOTOGRAFÍA PROPIA)	93
FIGURA 3-101 SCOPE (FUENTE: FOTOGRAFÍA PROPIA)	95
FIGURA 3-102 ESQUEMA DEL DISEÑO DEL MODELO MATEMÁTICO REAL (FUENTE: FOTOGRAFÍA PROPIA).....	96
FIGURA 3-103 XY GRAPH DEL MODELO REAL (FUENTE: FOTOGRAFÍA PROPIA)	96
FIGURA 3-104 SCOPE REAL (FUENTE: FOTOGRAFÍA PROPIA).....	97
FIGURA 3-105 SCOPE1 REAL (FUENTE: FOTOGRAFÍA PROPIA).....	97

ÍNDICE DE FIGURAS

TABLA 1 ESTUDIO INICIAL SISTEMA	31
TABLA 2 EJEMPLO CODIFICACIÓN PIEZAS Y SUBCONJUNTOS	49
TABLA 3 CÓDIGOS DE LOS SUBCONJUNTOS.....	50
TABLA 4 CÓDIGOS DE LAS PIEZAS	50
TABLA 5 MATERIALES, PROCESOS DE FABRICACIÓN, TRATAMIENTOS TÉRMICOS Y PROVEEDORES.....	52
TABLA 6 PROCESOS DE FABRICACIÓN, TRATAMIENTOS TÉRMICOS Y PROVEEDORES.....	57
TABLA 7 ELEMENTOS NORMALIZADOS	59
TABLA 8 CLASIFICACIÓN PROVEEDORES	60
TABLA 9 VALORES APLICADOS (FUENTE: VALORES PROPIOS)	70
TABLA 10 VALORES OBTENIDOS POR MOTION EN .CVS (FUENTE: VALORES PROPIOS)	71
TABLA 11 VALORES OBTENIDOS POR MOTION EN .CVS (FUENTE: VALORES PROPIOS)	76
TABLA 12 VALORES AJUSTADOS (FUENTE: VALORES PROPIOS)	79
TABLA 13 PRESUPUESTO.....	105

ÍNDICE DE EQUACIONES

ECUACIÓN 1.....	82
ECUACIÓN 2.....	83
ECUACIÓN 3.....	83
ECUACIÓN 4.....	83
ECUACIÓN 5.....	87
ECUACIÓN 6.....	87
ECUACIÓN 7.....	88
ECUACIÓN 8.....	88
ECUACIÓN 9.....	89
ECUACIÓN 10.....	91
ECUACIÓN 11.....	93
ECUACIÓN 12.....	94

Prefacio

1.1. Origen del trabajo

Este trabajo nace cuando mi director Leonardo Acho, del departamento de matemáticas, y mi co-directora Amelia Nápoles, del departamento de mecánica, deciden hacer un proyecto conjuntamente.

El objetivo se basaba en estudiar el comportamiento dinámico de los componentes de las válvulas de apertura y cierre que podemos encontrar en la culata de un vehículo (concretamente los muelles) y posteriormente mediante sensores de posición obtener valores que poder procesar mediante un control automático.

1.2. Motivación

Amelia Nápoles me propuso el proyecto, este inicialmente consistía en diseñar una maqueta física para poder hacer un estudio real del comportamiento del sistema de leva-válvula del motor, del cual remarco que no disponíamos de todas las piezas.

Se optó por representar en 3D y 2D todos sus componentes: bancada, árbol de levas, motor... mediante el programa SolidWorks puesto que con la simulación que este nos ofrece podríamos pedir a los técnicos del laboratorio de la EEBE que nos fabricasen los componentes que no teníamos (bancada, apoyos...) o bien comprar las piezas normalizadas (casquillos, correas, poleas...).

Una vez construida la maqueta y con la colaboración de Leonardo Acho, le instalaríamos sensores de posición en distintos puntos y para empezar a sacar datos experimentales para posteriormente proceder al control numérico.

El hecho de poder colaborar en un proyecto que abarca dos departamentos destinos, realizar una maqueta real para sacar datos experimentales y finalmente generar un “paper” para presentarlo en una revista científica fueron motivos más que suficientes para que aceptara con mucha ilusión el proyecto.

1.3. Requerimientos previos

Este proyecto abarca las siguientes asignaturas realizadas en la escuela: Ampliación de Expresión Gráfica (AEGM), Cinemática y Dinámica de Máquinas (CDIM), Diseño de Máquinas (DIMA), Elementos de Máquinas (EMQM), Fabricación (FAB), Ciencia y Ingeniería de los Materiales (CEEM) y Cálculo Numérico (CNED).

2. Introducción

Este Proyecto de Fin de Grado (TFG), realizará un estudio del mecanismo de apertura y cierre de una válvula en motores de combustión interna.

2.1. Objetivo general del trabajo

Diseñar una maqueta experimental para la detección de posibles fallos en fatigas del muelle principal en el mecanismo leva-válvula en motores de combustión interna.

Desarrollar un modelo matemático que permita el desarrollo de un sistema eficiente de detección de fallos en el desgaste de los muelles.

2.2. Objetivos específicos del proyecto

- **Diseño Mecánico:**
 - Estudio y cálculos del Sistema Leva-Balancín-Válvulas.
 - Selección de Poleas y Correas
 - Selección del Motor
- **Diseño de la Maqueta y posibles Experimentos:**
 - Montaje de la maqueta experimental.
 - Realización de ensayos:
 - Se variará el tamaño de las poleas (variación de la relación de transmisión con el motor (i))
 - Se usarán distintos muelles, algunos con defectos (variación de K).
- **Selección del Sistema de Control (sensores):**
 - Detector de velocidad de giro del árbol de levas (ω_{leva})
 - Detector de posición o presencia infrarrojo para detectar el desplazamiento de la válvula (D_L).
- **Diagnosticar comportamientos del Muelle:**
 - Diseño de un modelo matemático explicativo de fatigas en los muelles.

2.3. Alcance del trabajo

Estudio de un modelo de referencia físico: la una culata de un motor que proporcionó la co-directora el del proyecto.

El objetivo era diseñar una maqueta simplificada para poder realizar ensayos académicos del mecanismo leva-válvula del motor.

Para elaborar la maqueta los directores proporcionaron distintas piezas o conjuntos. El resto de elementos se tenían que diseñar y mandar a fabricar o decidir si era más óptimo comprarlos normalizados.

El objetivo es el estudio del desgaste de los muelles y para ello se decidió hacer ensayos con distintas velocidades de giro del árbol de levas. Se requería verificar la fuerza mínima que se necesita para comprimir los muelles.

Para un mejor estudio del comportamiento se variarán las características mecánicas de los muelles (tratamientos superficiales, deformaciones plásticas, etc.)

Para verificar que el mecanismo diseñado era correcto, se decidió usar el programa *SolidWorks*. Este permite representar piezas simuladas en 3D y posteriormente realizar planos en 2D.

Realizados los planos de las piezas de diseño propio, solamente hay que mandarlas a fabricar. En un principio se propuso fabricarlas con los técnicos del laboratorio de la *EEBE*.

Por motivos que se explican más adelante en el proyecto, se decidió no fabricar la maqueta y hacer simulaciones virtuales mediante el complemento "*SolidWorks Motion*".

No solamente se han realizado las simulaciones en la maqueta, sino que se ha desarrollado un modelo simple con resultados más precisos.

Finalmente, se observó que el estudio cinemático obtenido con el *Motion* era correcto, pero en cambio el dinámico no era congruente.

Una vez más se decidió cambiar el rumbo del proyecto, el definitivo. Con los datos cinemáticos obtenidos con el *Motion* se desarrolló un modelo matemático de fatiga mediante el complemento *Simulink* del *MATLAB*, satisfaciendo el objetivo principal del TFG.

3. Capítulos

3.1. Introducción a los motores de combustión interna y sus componentes.

3.1.1. ¿Qué es un motor de combustión interna?

Un motor a pistón o motor alternativo son máquinas a partir de las cuales la energía de un fluido es convertida en energía cinética para lograr el desplazamiento de uno o varios elementos del motor. De este modo se consigue como resultado un movimiento rotatorio y por lo tanto energía mecánica.

Una variedad de este tipo de motores son los motores de combustión, en los cuales una energía de tipo química que está contenida en un elemento combustible se convierte en energía mecánica gracias a un proceso de combustión. El combustible se mezcla con una cantidad de aire consiguiendo así la liberación de la transformación de la energía del combustible.

Según donde se realice el proceso de la combustión se puede clasificar según motor de combustión externa o interna:

Los motores de combustión externa son aquellos en los que el proceso de la combustión se realiza en una cámara de trabajo y el calor generado se transfiere al fluido de trabajo. Este será el responsable de generar la energía mecánica mediante un cambio de estado.

En motores de combustión interna son parecidos a los de combustión externa excepto por el fluido de trabajo. Este es el encargado de suministrar el oxígeno y de generar la energía mecánica resultante. Los motores de combustión interna tienen una gran variedad de tipología, seguidamente se hace una recogida de las más importantes:

- **Proceso de combustión:**
 - Ciclo Otto: Ciclo utilizado en los motores de ignición por chispa (por ejemplo, los motores de gasolina)
 - Ciclo Diesel: Ciclo utilizado en motores en el que el combustible tiene la propiedad de la auto ignición
- **Ciclos de trabajo:**
 - Dos tiempos
 - Cuatro tiempos
- **Combustible:**
 - Combustibles gaseosos (Ej. Propano, gas natural, hidrógeno, metano)

- Combustibles líquidos (Ej. Gasolina, Gasóleo, queroseno)
- Combustibles sólidos: (Ej. Carbón pulverizado)
- **Arquitecturas:** Referido a la distribución de los cilindros
 - Cilindros en línea
 - Cilindros en V
 - Cilindros en W
 - Cilindros en bóxer
 - Cilindros radiales
- **Tipo de distribución:** Referido a la composición de los elementos de distribución
 - OHC: Dispone de uno o dos árboles de levas en la culata del motor
 - SOHC: Contiene un único árbol de levas
 - DOHC: Contiene dos árboles de levas
 - SV: Sistema de válvulas laterales
 - OHV: Válvulas localizadas en el bloque del motor en vez de en la culata.

3.1.2. Componentes Principales

Pistón: Este componente crea una pared en movimiento rectilíneo que sella completamente la cámara de los gases y permite transmitir hacia el cigüeñal la potencia necesaria para generar el movimiento. Está compuesto por varias partes:

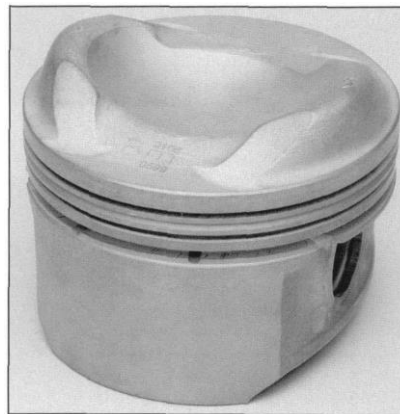


Figura 3-1 Pistón (Fuente: Internal combustion engine handbook)

- **Falda o pollera:** Parte del pistón desde el centro del orificio del perno hasta el extremo inferior.
- **Cabeza:** Parte superior del pistón que está en contacto con el fluido

Biela: Elemento rectilíneo que conecta el pistón al cigüeñal, encargado de soportar todas las fuerzas y transferirlo hacia el cigüeñal.

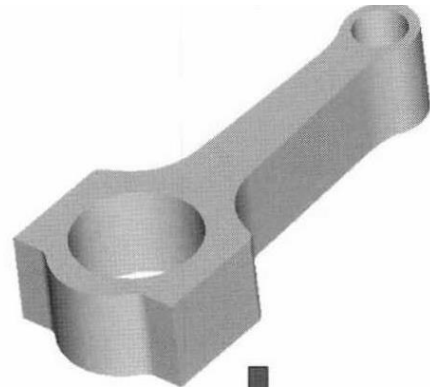


Figura 3-2 Biela (Fuente: Internal combustion engine handbook)

Anillos del pistón: Encargados de sellar por completo la cámara de combustión y de regular la cantidad de aceite del motor, pueden existir diferentes tipos de anillos para encargarse de estas funciones o un único anillo que cumpla ambas.

- **Cilindros:** Pieza en la cual el pistón está contenido y además es por donde éste se desplaza. El número y tamaño de los cilindros son los que clasifican el motor y definen su magnitud (cilindrada). Están altamente vinculados con la refrigeración, ya que al producirse en su interior la explosión del combustible suelen ir acompañados de un sistema que los refrigere, generalmente localizado en el bloque del motor.



Figura 3-3 Cilindro (Fuente: gasgas.com)

Bloque del motor: Elemento que se encarga de soportar todas las fuerzas producidas por el cigüeñal, las bielas y los pistones, además de servir como contenedor para estas piezas. Suelen tener cavidades por las cuales circulan el lubricante del motor y el

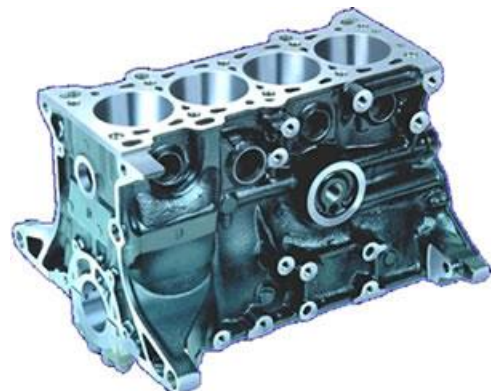


Figura 3-4 Bloque del motor (Fuente:

líquido refrigerante.

aficionadosalamecanica.net)

Cárter: Pieza que aísla el motor por la zona inferior, es decir, en la zona del cigüeñal, cumple con la función de contener el líquido lubricante del motor, generalmente suele ser aceite. Asimismo, tiene la función de refrigerar este lubricante.



Figura 3-5 Cárter (Fuente: interempresas.net)

Culata: Colocada encima del bloque del motor, sella la parte superior del motor, es decir, por la zona de los cilindros. Generalmente también hace de receptáculo a las válvulas, los balancines y el árbol de levas. En los motores de ignición por chispa también contienen un espacio para la bujía, en cambio en los motores de autoignición contiene un espacio para el inyector de combustible



Figura 3-6 Culata (Fuente: ro-des.com)

Cigüeñal: Pieza conectada a las bielas que se encarga de transformar los movimientos rectilíneos de los pistones en movimientos rotatorios mediante la generación del par motor.



Figura 3-7 Cigüeñal (Fuente: mecanicaymotores.com)

Distribución: Compuesto por varias piezas, es el encargado de la combustión en el motor gracias a que regula la entrada de los gases combustibles y la salida de los gases residuales, esto es logrado gracias al control de la apertura y cierre de las válvulas.

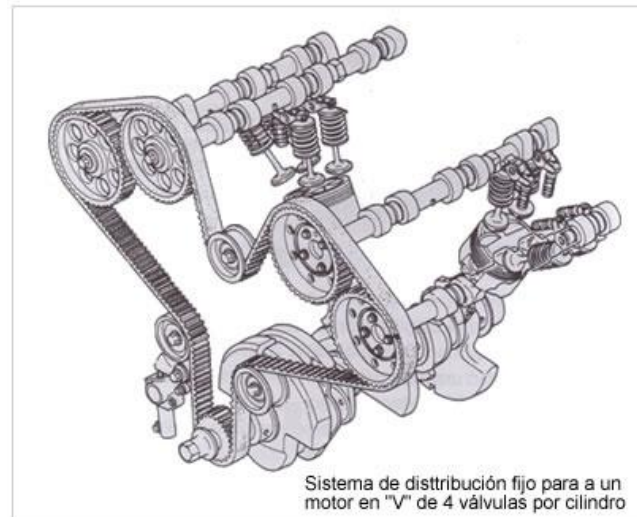


Figura 3-8 Distribución (Fuente: aficionadosalamecanica.net)

- **Correa de distribución:** Pieza que une el cigüeñal y el árbol de levas. Extrae las fuerzas necesarias para lograr el movimiento del árbol de levas. Antiguamente se usaba un sistema de engranajes.
- **Poleas de distribución:** Elementos que sirven de sostén para las poleas y que transmiten las fuerzas a los elementos que contienen (árbol de levas)
- **Árbol de levas:** Un eje que tiene colocado diferentes levas posicionadas de manera precisa que controla la apertura y cierre de las válvulas forzando el movimiento de éstas. Cabe destacar que dependiendo de la colocación y número del árbol de levas se puede distinguir entre varios tipos de motor. Es una pieza vital en los sistemas de distribución modernos, ya que son la clave central de que el motor funcione coordinadamente.
- **Balancín:** Pieza que se encarga de unir el árbol de levas con las válvulas, tiene al función de empujar las válvulas, forzando el movimiento y a la vez de hacer de tope como sistema de seguridad para que las válvulas permanezcan en su posición.



Figura 3-9 Correa y poleas de distribución (Fuente: automotoryventas.com)



Figura 3-10 Árbol de levas (Fuente: Imagen propia)



Figura 3-11 Balancín (Fuente: Imagen propia)

- Válvulas: Encargadas de controlar el flujo de los fluidos mediante su apertura y cierre. Están conformadas por un vástago alargado, un disco plano o cabeza y un muelle que facilita el retorno a la posición inicial. Estas válvulas están tratadas para soportar altas temperaturas y procesos de fatiga, además de estar correctamente lubricadas para su movimiento se produzca con los mínimos rozamientos posibles. Existen dos tipos de válvulas.



Figura 3-12 Válvula de admisión (Fuente: Imagen propia)

- Válvula de admisión: Encargada de permitir entrada del gas combustible, generalmente es mayor que la válvula de escape.
- Válvula de escape: Encargada de permitir la salida de los gases residuo.

3.1.3. Funcionamiento

3.1.3.1. Ciclos de trabajo:

- Dos tiempos:

Para completar un ciclo termodinámico (admisión, compresión, expansión y escape) hace falta que se produzcan dos carreras del pistón, que es equivalente a una vuelta completa del cigüeñal. Se puede diferenciar de manera rápida de un motor de cuatro tiempos ya que contiene una única válvula que se encarga de la admisión del combustible o ninguna válvula, siendo la posición del pistón la que se ocupa de generar la entrada y salida de los gases. Debido a la compresión de los cuatro ciclos en dos tiempos se obtiene una menor eficiencia, produciendo más gases residuales y menor potencia.

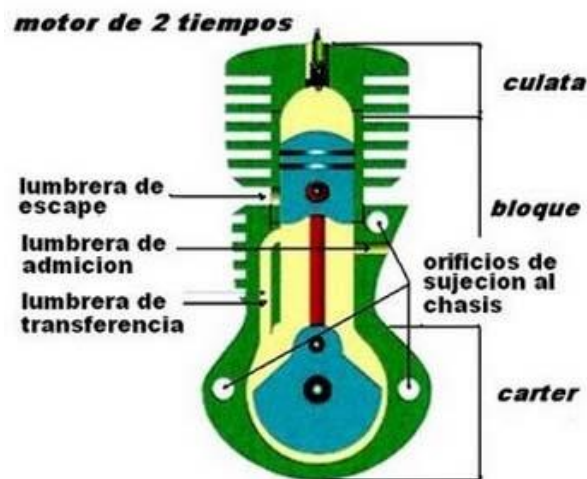


Figura 3-13 Motor de dos tiempos (Fuente: psicodelicia7.files.wordpress.com)

- Cuatro tiempos:

Tipo de motor que necesita realizar cuatro carreras de pistón para completar el ciclo termodinámico. Siempre contiene dos válvulas por cilindro que se encargan de la admisión del combustible y de la expulsión de los gases residuales. Son generalmente más potentes.

3.1.3.2. Funcionamiento de un motor de cuatro tiempos:

- **Primer tiempo. Admisión:**

En esta primera fase el pistón se encuentra comprimiendo la cámara de combustión y desciende, provocando una caída de presión y facilitando la entrada del aire en el caso de un motor diésel (ciclo *Diesel*) o una combinación de aire y combustible en el caso de motor de gasolina (ciclo de *Otto*).

Para que pueda producirse el movimiento del fluido la válvula de admisión debe de estar abierta. Para que esto se suceda el mecanismo de distribución debe forzar a que esta válvula se abra desde el momento en el que el pistón comienza a bajar, mediante el empuje del árbol de levas, y se cierra gracias a un mecanismo de recolocación original (generalmente un muelle) en cuanto ha llegado hacia el extremo inferior.

El cigüeñal completa un giro de 180° y el árbol de levas 90° durante esta etapa y la válvula de expulsión está cerrada.

- **Segundo tiempo. Compresión:**

Durante la fase de compresión el pistón se desplaza hacia la parte superior del cilindro, comprimiendo la cámara de combustión y por lo tanto concentrando el fluido existente a la vez que se calienta.

Durante esta etapa el cigüeñal completa la primera vuelta y el árbol de levas gira 90° de nuevo y las válvulas están completamente cerradas.

- **Tercer tiempo. Expansión:**

En esta fase, en el caso de los motores diésel se inyecta el combustible a partir de inyectores de manera que el combustible queda pulverizado.

Al principio de esta fase se alcanza la presión máxima y se produce la explosión del combustible, gracias a esta combustión, el pistón es empujado hacia abajo, y es la etapa donde se transmiten las fuerzas hacia el cigüeñal.

En los motores diésel el combustible se auto inflama debido a la alta presión existente, en cambio en los motores de gasolina la bujía se encarga de producir una chispa que genera la explosión.

Durante esta etapa el cigüeñal gira 180° y el árbol de levas 90° , las válvulas están completamente cerradas.

- **Cuarto tiempo. Escape:**

En la fase final el pistón vuelve a desplazarse hacia la parte superior y la válvula de expulsión se abre al principio del tiempo hasta el final del tiempo. Gracias a que el pistón comprime la cámara de combustión se empujan los gases hacia el exterior.

El árbol de levas gira 90º y completa un giro completo, el cigüeñal gira 180º y completa dos giros completos y la válvula de admisión está cerrado.

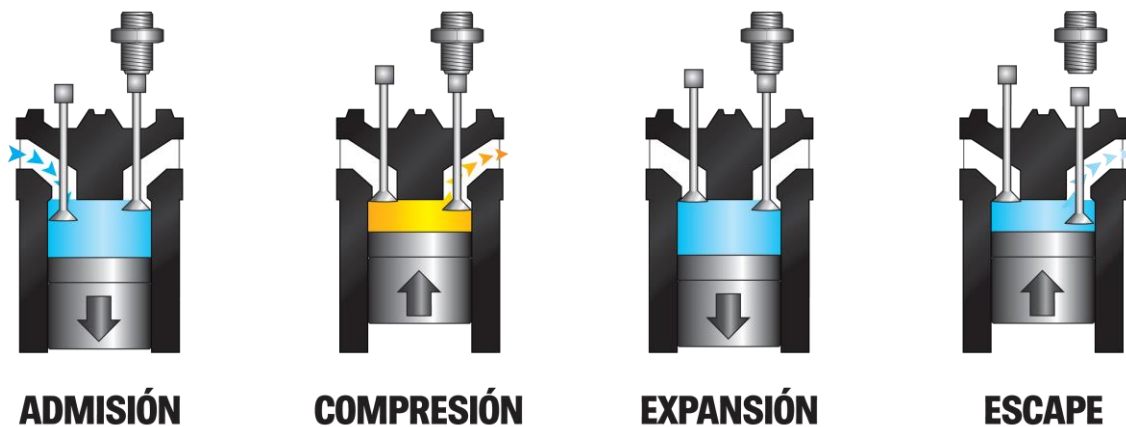


Figura 3-14 Etapas de un motor de cuatro tiempos (Fuente: mecanicaymotores.com)

3.2. Desarrollo esquemático de una maqueta experimental para la detección de posibles fallos en fatigas del muelle principal en el mecanismo de apertura y cierre de una válvula en motores de combustión interna.

3.2.1. Estudio previo

La parte práctica de este proyecto se inició en el laboratorio docente de Mecánica, situado en la planta 7 del Edificio A de la *Escola d'Enginyeria de Barcelona Est* (EEBE).

Este dispone de la culata de una furgoneta para uso docente en las prácticas de dicho laboratorio.

Inicialmente, la única información que se dispone del mecanismo es que pertenecía a una furgoneta de la marca Mercedes-Benz y que debe tratarse de un modelo bastante antiguo, de alrededor unos treinta o cuarenta años atrás.

A partir de las características observables del motor estudiadas en el apartado anterior, se ha deducido que se trata de motor Diésel ya que no se observa ningún tipo de mecanismo de ignición forzada, con lo cual el combustible empleado debe de ser ignífugo. Se puede observar que es un motor de cuatro cilindros con un sistema de distribución SOHC y que dispone de dos válvulas por cilindro, claros indicios de un régimen de cuatro tiempos.

Con esta información y sabiendo que perteneció a una furgoneta Mercedes-Benz de alrededor del 1975, se puede suponer que perteneció al modelo 206D o 306D que son las furgonetas que la reconocida marca distribuía en ese momento.

Tal como se muestra en la siguiente Figura 3-15, la culata no está completa. Se puede observar que incluye: Bancada, Árbol de Levas, Rueda dentada, Apoyos, Balancines con sus respectivos soportes y finalmente, Válvulas de admisión y escape que incluyen los muelles a estudiar. En cambio, faltan componentes como: las Cadenas, el Cigüeñal, etc.

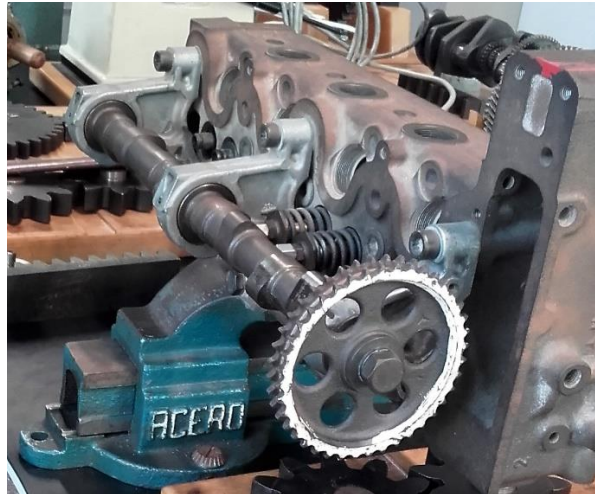


Figura 3-15 Culata de una furgoneta Mercedes-Benz del laboratorio de Mecánica (Fuente: Fotografía propia)

Una vez familiarizado el mecanismo, véase Figura 3-16 el objetivo era claro: diseñar un nuevo prototipo con el cual poder experimentar, ya que no se tenía permiso para utilizar enteramente la culata del laboratorio.

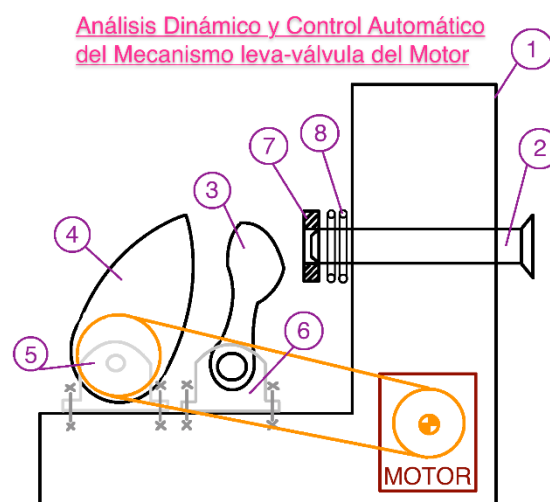


Figura 3-16 Estudio inicial sistema (Fuente: Elemento propio)

Tabla 1 Estudio inicial sistema

Nº	Nombre Pieza	Especificaciones
1	Bancada	Estructura del mecanismo
2	Válvula/ Vástago/Tallo/Empujador	Movimiento lineal
3	Balancín	Movimiento rotacional limitado
4	Leva y Árbol de levas	Movimiento rotacional
5	Soporte Árbol de Levas	Mecanismo de anclaje
6	Soporte Balancín	Mecanismo de anclaje
7	Retenedor del Muelle de la Válvula	Roscada Exterior
8	Muelle	Muelle de retroceso

Finalmente, se optó por usar el programa *SolidWorks* para modelizar la maqueta ya que es una herramienta potente y utilizada en la actualidad en empresas de diseño de máquinas. Este puede mostrar al milímetro una representación en 3D del prototipo permitiendo así detectar posibles fallos, medir distancias, hacer simulaciones con los complementos *Motion* o *Simulation* y representar los planos de las piezas o conjuntos para poder mandarlos a fabricar, entre otros.

3.2.2. Desarrollo del prototipo

La gracia del proyecto consiste, en parte, en que no se disponían de todas las piezas para poder montar la maqueta, es más, un factor clave y determinante de este proyecto fue saber combinar distintas piezas procedentes de distintos proveedores.

Para poder desarrollar el prototipo, en primer lugar, se optó por dibujar las piezas que se disponían con el programa *SolidWorks*. Estas piezas son las que se muestran en la Figura 3-17, las cuales o bien provenían de la culata del laboratorio, o bien se tenía acceso a usarlas, o bien las proporcionó el director del proyecto.

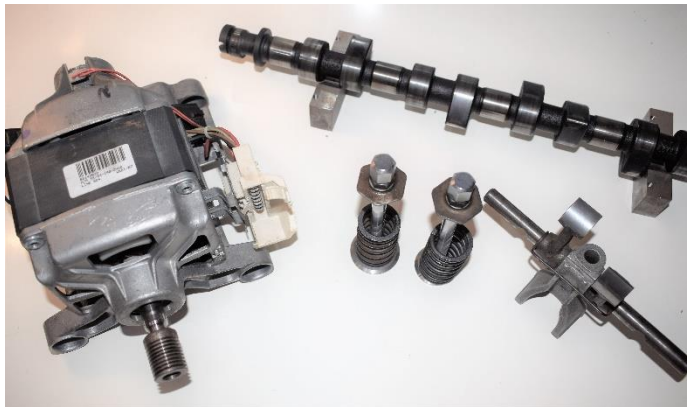


Figura 3-17 Piezas disponibles para el prototipo (Fuente: Fotografía propia)

Para mayor comodidad al tomar las medidas (pie de rey, reloj comparador, metro...) y para estudiar más a fondo el modelo del laboratorio, se procedió a desmontarlo parcialmente y se extrajeron algunas de las piezas. De este modo, se pudo asegurar que se tuvieron en cuenta todos los elementos de la maqueta, incluso los ocultos a simple vista.

Con este procedimiento se constató que había elementos integrados en el modelo y se tenían que tener en cuenta para la futura maqueta como, por ejemplo, las guías de las válvulas de admisión y escape tal como se puede observar en siguiente laFigura 3-18.



Figura 3-18 Extracción de piezas del modelo (Fuente: Fotografía propia)

Una vez se sacaron las medidas reales de las piezas y se representaron en 3D con el programa *SolidWorks*, se diseñaron el resto de las piezas de las que no se disponían (bancada, soportes...) por un lado las de diseño propio y por otro las que comprar normalizadas.

En este punto, es importante hacer hincapié de los objetivos que se establecieron para hacer la maqueta: ser funcional, resistente y a la vez económica. Con los objetivos en mente y después de hablar con expertos del ámbito mecánico, se tomaron decisiones que divergen con el modelo original:

- Se decidió usar poleas y correas normalizadas en vez de la rueda dentada y con cadena. El motivo fue principalmente porque el tipo de uso que se le dará, al ser un prototipo, es mucho más económico y se ajusta correctamente con el árbol de levas al motor que se disponía.
- La bancada de la maqueta tiene una forma peculiar ya que solamente tiene dos mecanizaciones para colocar las válvulas, es decir, se ha ahorrado material, pero a la vez ha servido para dar soporte al motor y los soportes del árbol de levas.
- No se disponen de los soportes del árbol de levas. Se tenían que mecanizar. Los soportes que forman el modelo están hechos por fundición y en cambio para la maqueta se decidió mecanizarlos. Después de hablar con expertos se nos recomendó hacerlos con formas más sencillas para ahorrar costes.
- Finalmente se decidió idear un sistema donde el motor se pudiera cambiar de posición fácilmente que permitiese ajustar correctamente la tensión de las correas y poleas de los distintos tamaños que se disponían.

Finalmente se obtuvo con éxito la primera fase de la parte práctica de este proyecto: diseñar una maqueta simulada del mecanismo leva-motor con el programa *SolidWorks*.

Una vez representadas las piezas, los subconjuntos y el ensamblaje total, se procedió a dibujar los planos en 2D. El programa permite exportar los planos en distinto formato como, por ejemplo, el .pdf o el .dxf, los cuales se usaron para enviar a distintos proveedores con el fin de que nos presupuestaran las piezas que no se disponían.

3.2.3. Presentación de los Componentes, Subensamblajes y Ensamblajes

En este apartado se pretende presentar las piezas que conforman la maqueta dibujada con el programa *SolidWorks*. Para mayor conocimiento de dichas piezas ver Anexos.

Las piezas no solamente han sido representadas en 3D, sino que además el programa permite añadir los materiales de cada pieza. De esta forma se puede obtener información importante, como, por ejemplo, su peso.

En *SolidWorks* se trabaja mucho con las “Apariencias”. Básicamente el programa las representa predefinidamente de color gris y una vez se ensamblan cuesta diferenciarlas. Por ello, cada pieza se colorea de un color distinto.

Se ha de comentar que las piezas fabricadas por fundición, son muy complejas de representar ya que no suelen presentar simetrías o formas sencillas. Aun así, se ha aproximado al máximo a la realidad y son gratamente funcionales.

Finalmente, se decidió que las piezas que se disponían proporcionadas o bien de la culata del modelo del laboratorio o bien por el director del proyecto, se añadirán en este apartado para poder compararlas con las representadas en 3D.

3.2.3.1. Bancada

La bancada es la base donde se colocarán elementos modelizados. Esta debe de ser robusta para soportar todas las fuerzas generadas a partir de las piezas rotantes.

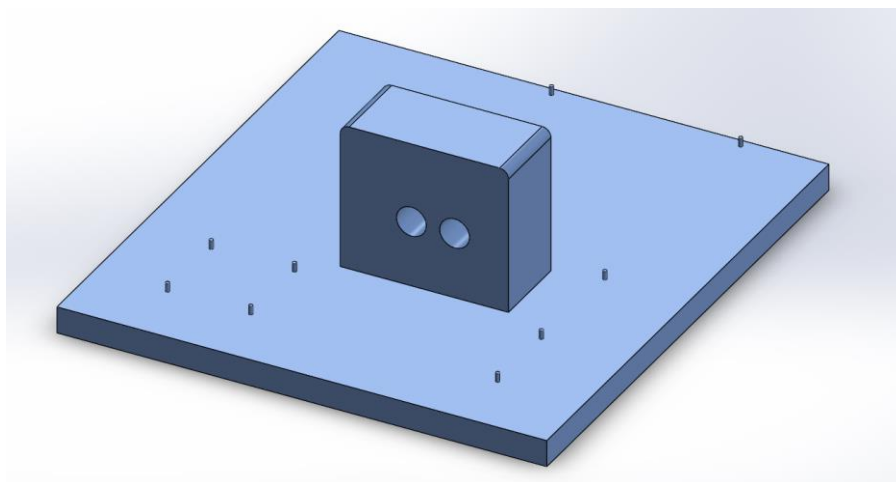


Figura 3-19 Bancada modelizada con SolidWorks (Fuente: Imagen propia)

3.2.3.2. Válvula de Admisión

La válvula de admisión es la encargada de dejar paso al aire exterior o una mezcla de aire y gasolina al moverse, dependiendo de si es un motor diésel o de gasolina respectivamente.

Este proceso se lleva a cabo en el primer tiempo en un motor de cuatro tiempos.

La válvula de admisión se ha clasificado como un subconjunto formado por: Vástago, Muelle, Tuerca, Retenedor de Muelle y Tapón.



Figura 3-20 Válvula de admisión real disponible (Fuente: Imagen propia)

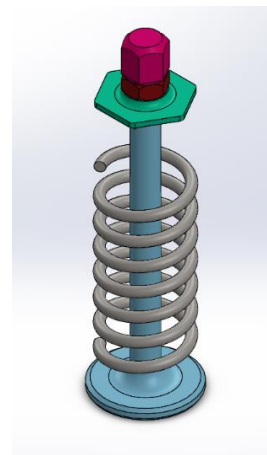


Figura 3-21 Ensamblaje completo de la válvula de admisión modelizada (Fuente: Imagen propia)

Desglose de las piezas del ensamble

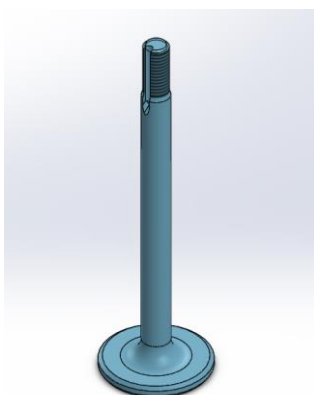


Figura 3-22 Vástago de admisión modelizado (Fuente: Imagen propia)

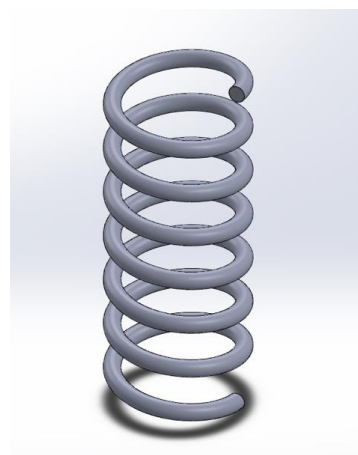


Figura 3-23 Muelle de admisión modelizado (Fuente: Imagen propia)

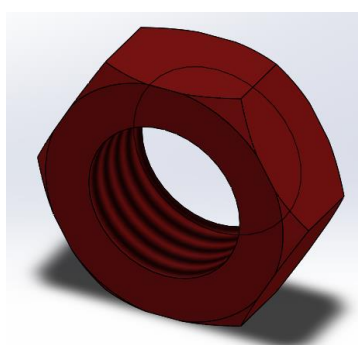


Figura 3-24 Tuerca de admisión modelizado (Fuente: Imagen propia)

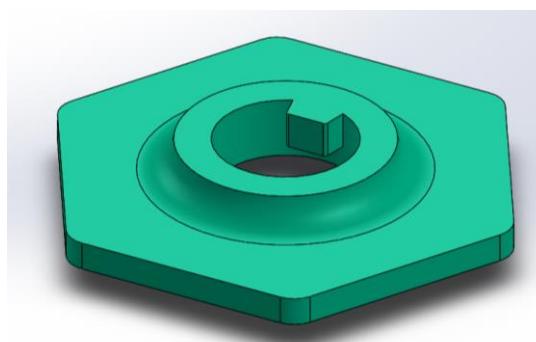


Figura 3-25 Soporte válvula-muelle de admisión modelizado (Fuente: Imagen propia)

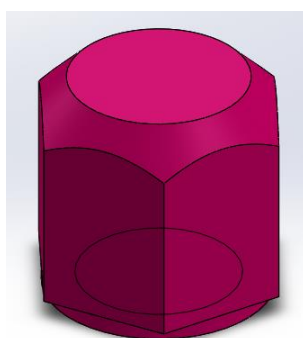


Figura 3-26 Tapón de admisión modelizado (Fuente: Imagen propia)

3.2.3.3. Válvula de Escape

La válvula de escape es la encargada de dejar paso a los residuos del interior de la cámara de combustión al moverse.

Este proceso se lleva a cabo en el cuarto y último tiempo en un motor de cuatro tiempos.

La principal diferencia física de la válvula de admisión y escape es que la segunda tiene el diámetro de la base menor. Esto es debido a que permite hacer salir más rápidamente los gases ya explosionados del motor.

La válvula de escape se ha clasificado como un subconjunto formado por: Vástago, Muelle, Tuerca, Retenedor de Muelle y Tapón.



Figura 3-27 Válvula de escape real disponible (Fuente: Imagen propia)

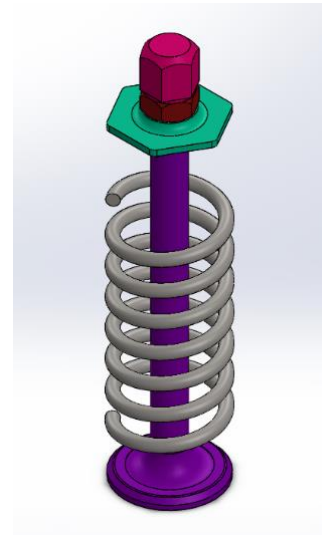


Figura 3-28 Ensamblaje completo de la válvula de escape modelizada (Fuente: Imagen propia)

Desglose de las piezas del ensamblaje



Figura 3-29 Vástago de escape modelizado (Fuente: Imagen propia)

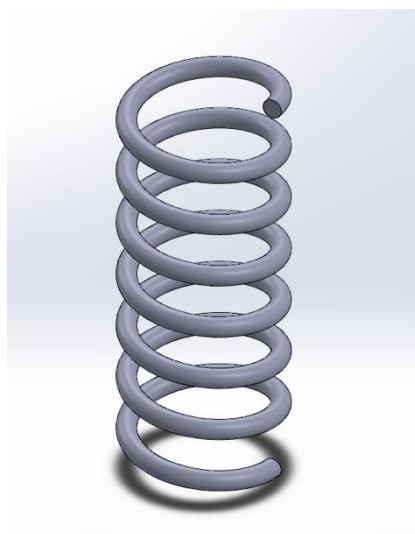


Figura 3-30 Muelle de escape modelizado (Fuente: Imagen propia)

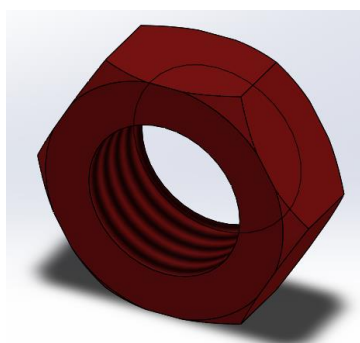


Figura 3-31 Tuerca de escape modelizado (Fuente: Imagen propia)

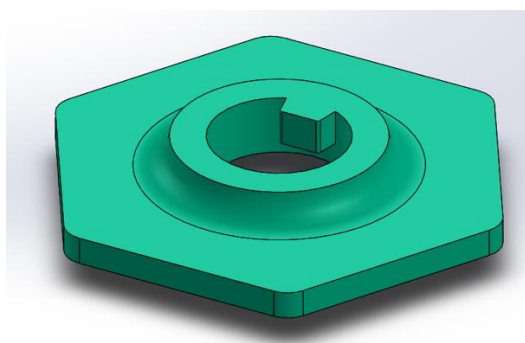


Figura 3-32 Soporte válvula-muelle de escape modelizado (Fuente: Imagen propia)

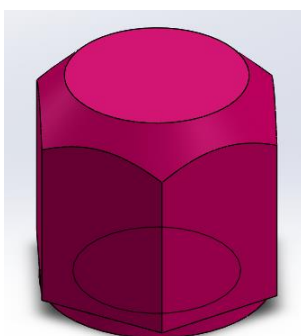


Figura 3-33 Tapón de escape modelizado (Fuente: Imagen propia)

3.2.3.4. Balancín

Los balancines son las piezas encargadas de transmitir las fuerzas producidas por el árbol de levas hacia las válvulas de admisión o escape para que estas puedan moverse.

El balancín también debe encargarse de que el movimiento de las válvulas sea limitado, es decir, tiene que actuar como un elemento de seguridad.

Se ha clasificado el balancín como un subconjunto formado por: Balancín, Soporte, Eje, Tornillo y Elemento de Sujeción.



Figura 3-34 Balancín completo real disponible (Fuente: Imagen propia)

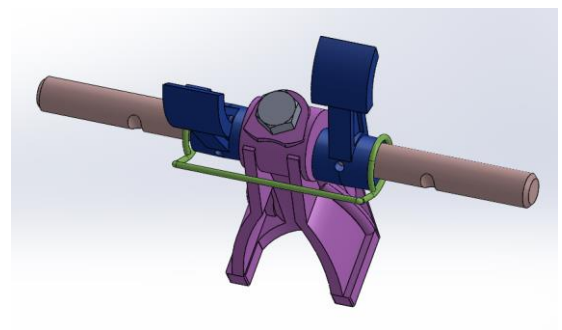


Figura 3-35 Ensamblaje completo del balancín modelizado (Fuente: Imagen propia)

Desglose de las piezas del ensamblaje

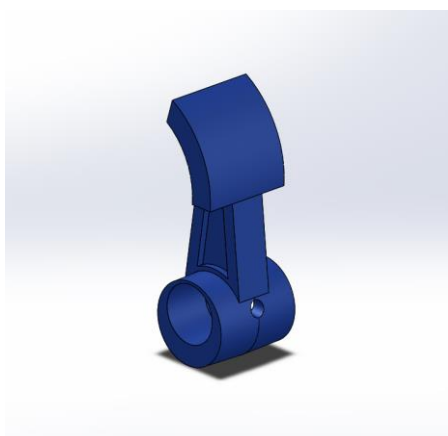


Figura 3-36 Balancín modelizado (Fuente: Imagen propia)

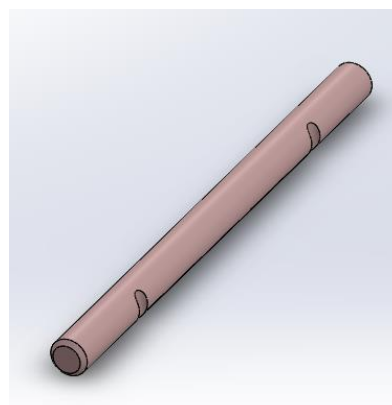


Figura 3-37 Eje de sujeción del balancín modelizado (Fuente: Imagen propia)

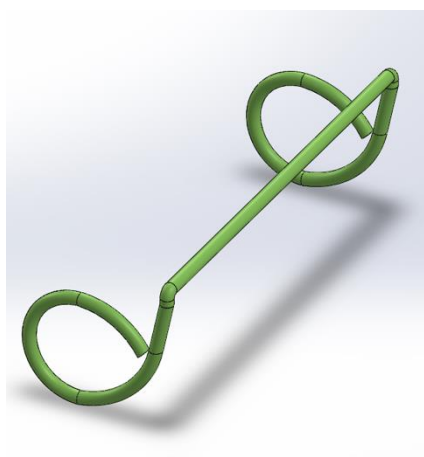


Figura 3-38 Sujeción del balancín modelizado (Fuente: Imagen propia)

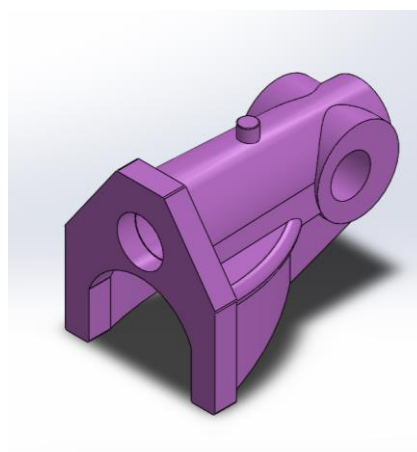


Figura 3-39 Soporte del balancín modelizado (Fuente: Imagen propia)

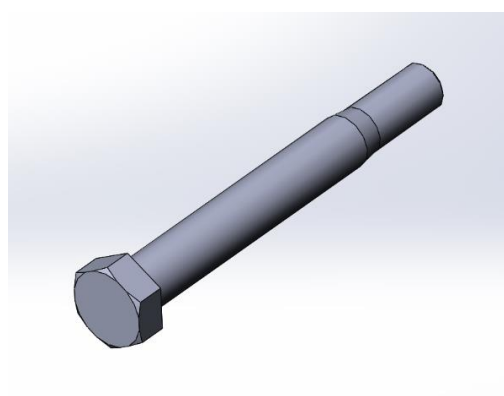


Figura 3-40 Tornillo sujetor del soporte del balancín modelizado (Fuente: Imagen propia)

3.2.3.5. Árbol de levas

El árbol de levas es un componente formado por un eje sobre el cual se disponen diferentes levas a distintos grados de rotación. Es uno de los componentes que forman el sistema de distribución y se encarga de que la apertura y el cierre de las diferentes válvulas del motor se produzcan de manera correcta y sincronizada.



Figura 3-41 Árbol de levas real disponible (Fuente: Imagen propia)



Figura 3-42 Árbol de levas modelizado (Fuente: Imagen propia)

3.2.3.6. Poleas y correas

Las poleas y correas corresponden a los elementos de la transmisión de fuerzas entre las distintas partes del motor. En este caso, se utilizan para relacionar el movimiento del motor con el movimiento del árbol de levas.

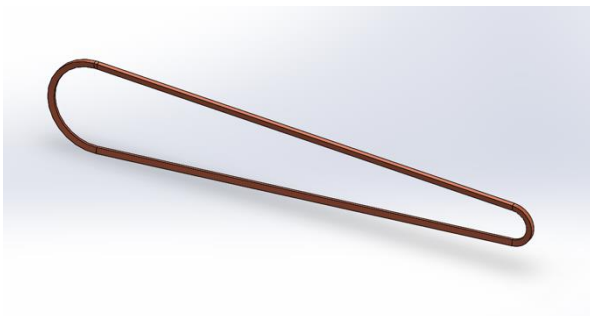


Figura 3-43 Correa modelizada (Fuente: Imagen propia)



Figura 3-44 Polea modelizada (Fuente: Imagen propia)

3.2.3.7. Elementos de fijación a la bancada

En este apartado se incluyen los elementos de fijación anclados a la Bancada.

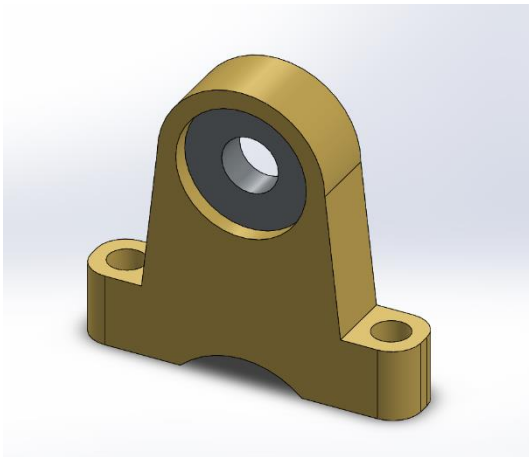


Figura 3-45 Soporte del árbol de levas a la bancada (Fuente: Imagen propia)

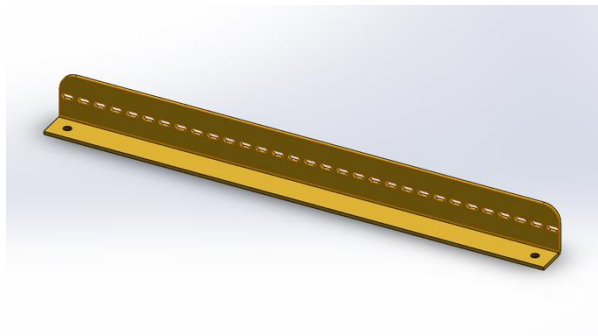


Figura 3-46 Soporte del motor a la bancada (Fuente: Imagen propia)

3.2.3.8. Motor

Para poder mover el mecanismo de la maqueta se ha instalado un motor de 460 W de una lavadora, proporcionado por el director del proyecto. Su objetivo consiste en mover el árbol de levas y que este finalmente comprima el muelle, objeto de estudio.



Figura 3-47 Motor real disponible (Fuente: Imagen propia)

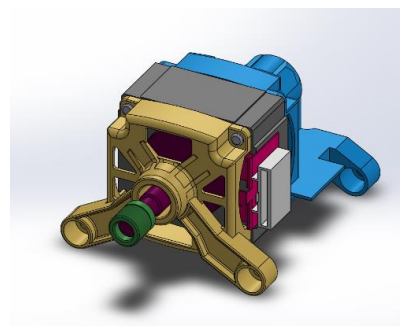


Figura 3-48 Ensamblaje completo del motor modelizado (Fuente: Imagen propia)

Desglose de las piezas del ensamblaje

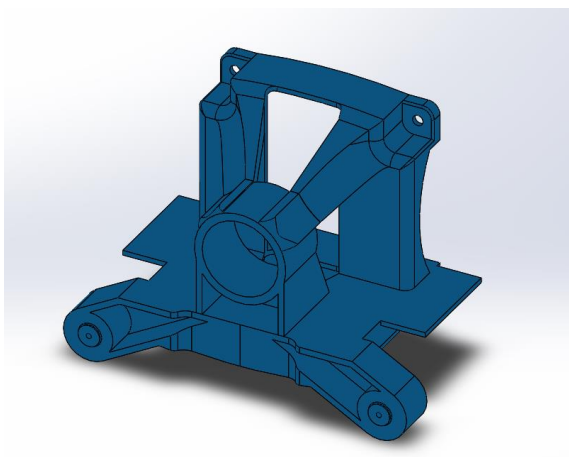


Figura 3-49 Pieza trasera del motor modelizado (Fuente: Imagen propia)

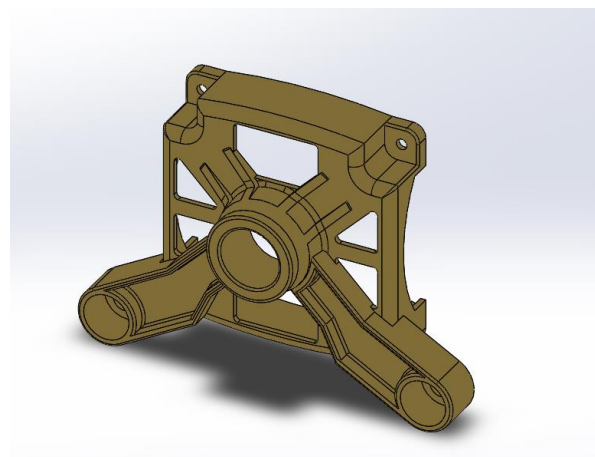


Figura 3-50 Pieza delantera del motor modelizado (Fuente: Imagen propia)

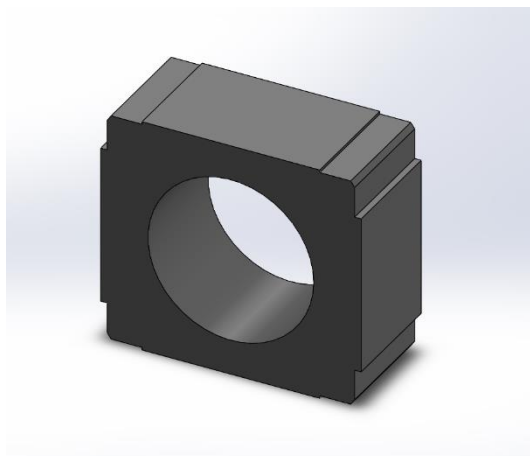


Figura 3-51 Pieza central del motor modelizado (Fuente: Imagen propia)

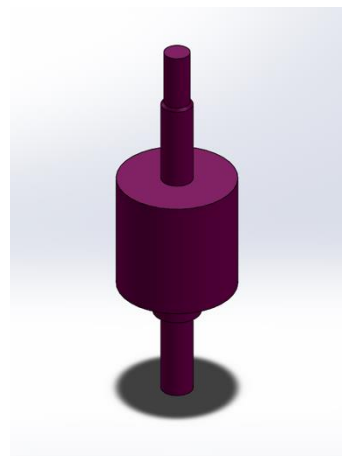


Figura 3-52 Bobina y eje del motor modelizado (Fuente: Imagen propia)

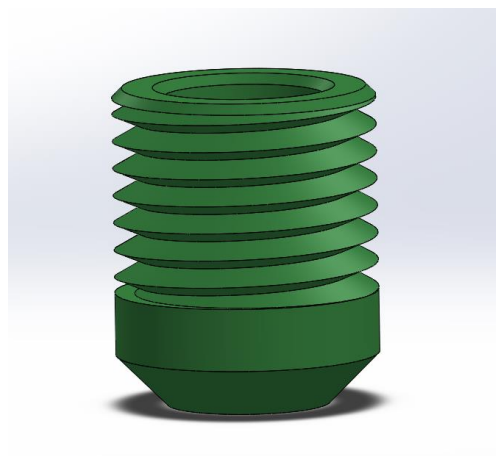


Figura 3-53 Polea del motor modelizado (Fuente: Imagen propia)

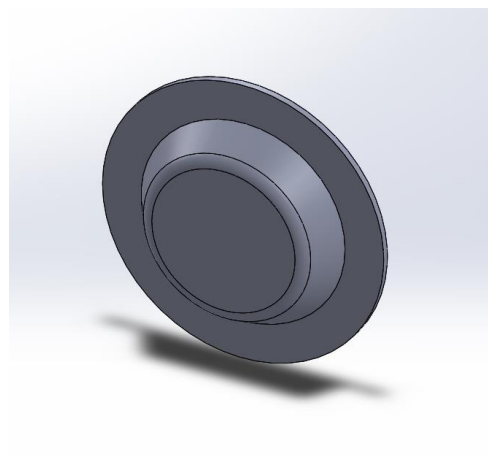


Figura 3-54 Tapa de la polea del motor modelizado (Fuente: Imagen propia)

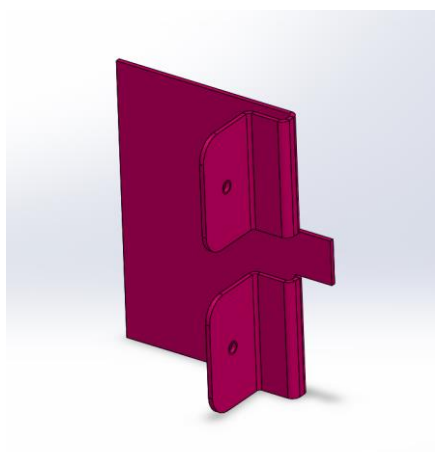


Figura 3-55 Soporte regleta del motor modelizado
(Fuente: Imagen propia)

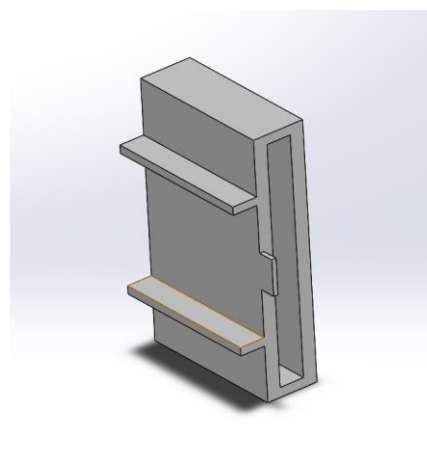


Figura 3-56 Regleta del motor modelizado (Fuente: Imagen propia)



Figura 3-57 Tornillo interno del motor modelizado
(Fuente: Imagen propia)

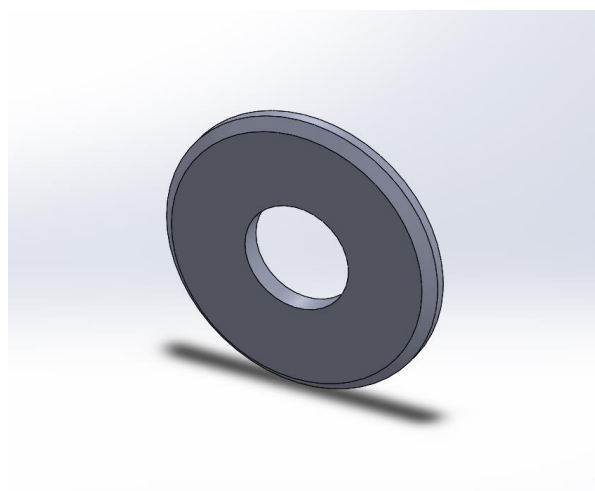


Figura 3-58 Arandela interna del motor modelizado (Fuente: Imagen propia)

3.2.3.9. Complementos

En este apartado se incluyen los elementos que permiten el anclaje entre las distintas piezas de la maqueta.

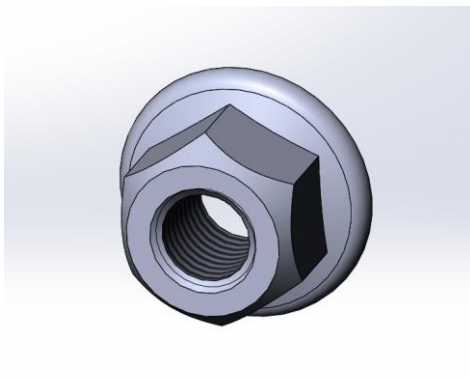


Figura 3-59 Tuerca modelizada A (Fuente: Imagen propia)

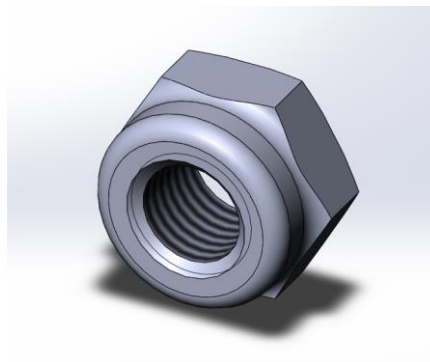


Figura 3-60 Tuerca modelizada B (Fuente: Imagen propia)

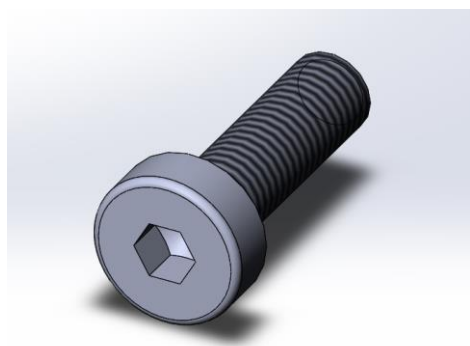


Figura 3-61 Tornillo modelizado A (Fuente: Imagen propia)



Figura 3-62 Tornillo modelizado B (Fuente: Imagen propia)

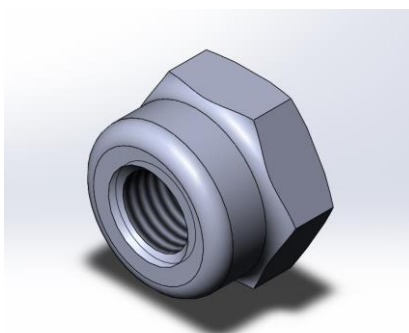


Figura 3-63 Tuerca modelizada C (Fuente: Imagen propia)

3.2.4. Ensamblaje

Una vez dibujados todos las piezas y los subconjuntos, mediante relaciones de posición normales (coincidentes, concéntricas...), avanzadas (ancho) y mecánicas (leva) se obtiene la maqueta final virtual, mostrada en la figura 3-64.

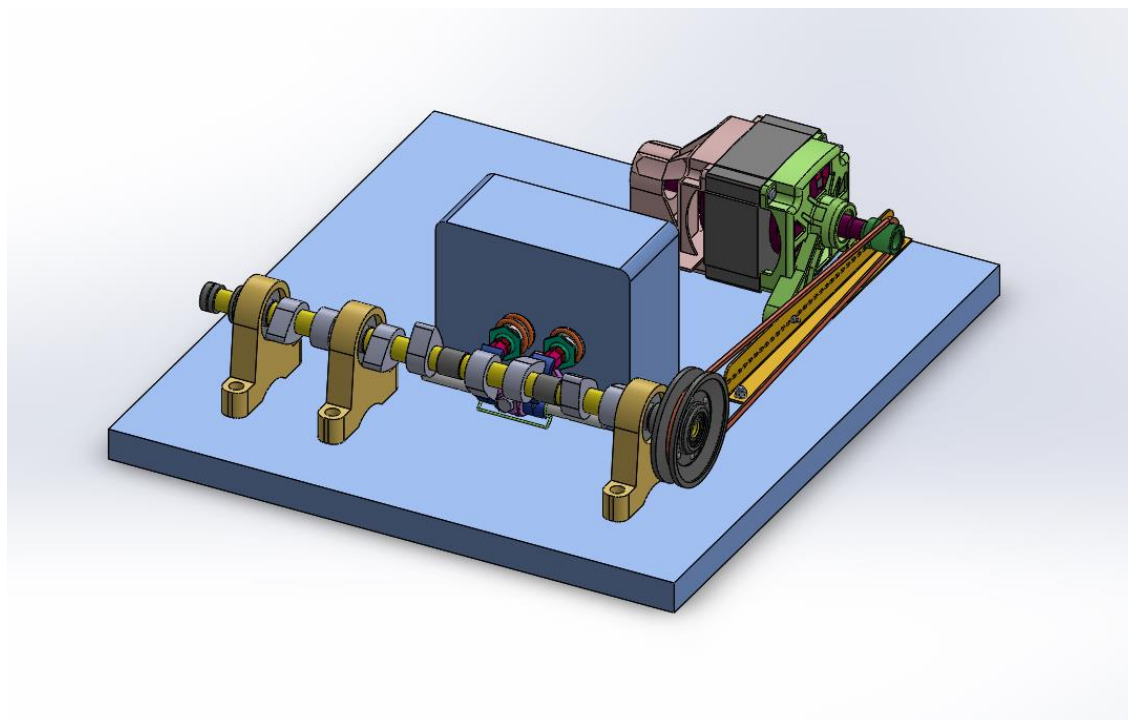


Figura 3-64 Ensamblaje virtual de la Maqueta

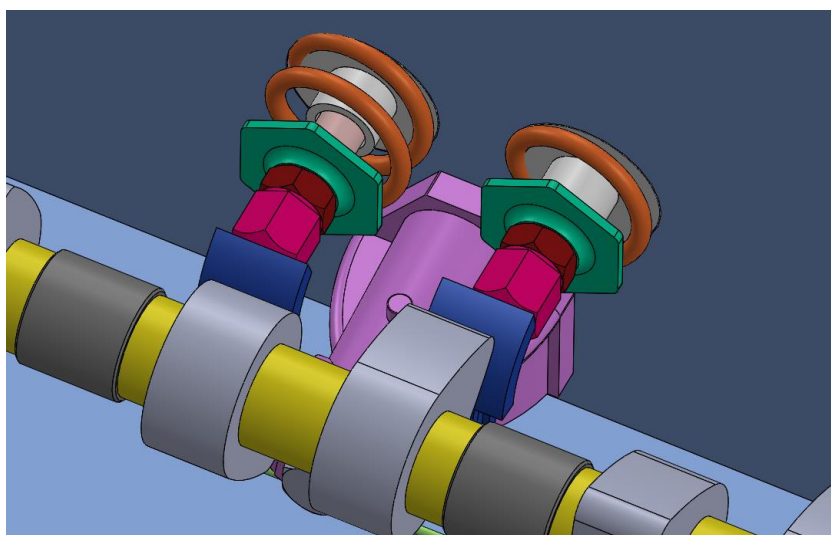


Figura 3-65 Detalle 1 de la Maqueta virtual

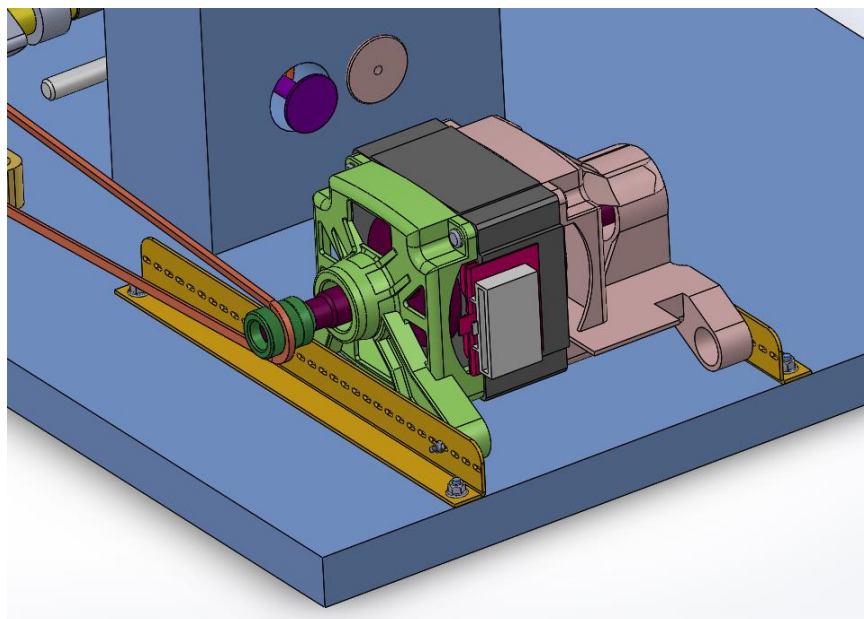


Figura 3-66 Detalle 2 de la Maqueta virtual

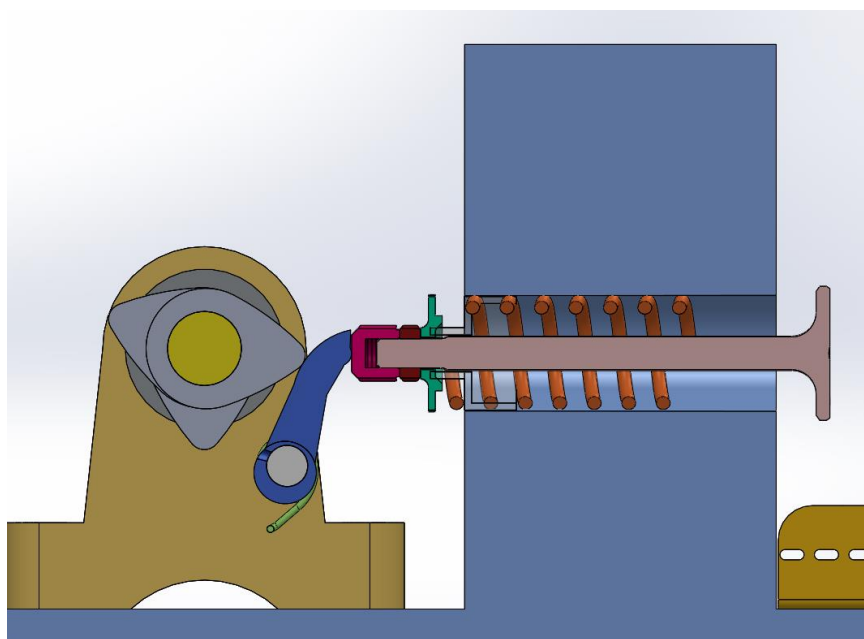


Figura 3-67 Detalle 3 de la Maqueta virtual

3.2.5. Codificación del proyecto

La manera de codificar las piezas dibujadas en *SolidWorks* se divide en tres grupos: Piezas, Subensamblaje/Subconjunto y Ensamblaje.

Basado en la organización que se usa en programas como *Navision (NAV)*, se optó por generar un sistema de codificación distinto al proporcionado en la escuela. El objetivo es que sea sencillo para simular el pedido entero del prototipo, así como su presupuesto, proveedores, stock, etc.

Reglas de codificación establecidas:

- Cada pieza debe tener su propio código numérico (001, 002, 003...). Se han establecido tres cifras por defecto puesto que el prototipo no tiene más de 100 piezas.
- En caso que se decida cambiar de material también deberá cambiar de código. El objetivo es no perder información de los distintos pedidos y rutas con sus respectivos proveedores.
- Cada subensamblaje debe tener su propio código alfabético (A,B,C...). Se ha establecido por defecto que los conjuntos sean letras puesto que el prototipo no tiene más de 10 subensamblajes. En un caso real también deberían estar formados por códigos numéricos, pero se usaron letras para simplificar el sistema.
- Distintos subensamblajes pueden contener las mismas piezas.
- Solamente hay un ensamblaje, el prototipo de estudio: mecanismo leva-válvula del motor.

Mediante estas reglas se pretende evitar la siguiente situación:

El subensamblaje “Válvula de Admisión” está compuesto por 5 piezas distintas: Vástago válvula admisión, Muelle, Tapón, Tuerca, Soporte. El método usado en la escuela sería llamar al conjunto por un código, por ejemplo: 001. Para diferenciar uno de sus elementos, por ejemplo, el Vástago de válvula de escape, se llamaría 001_Pieza1, del mismo modo se llamaría al Muelle 001_Pieza2 y así sucesivamente.

Seguidamente se procedería a codificar otro subensamblaje, la “Válvula de Escape”, también compuesta por 5 piezas distintas. Para seguir el ejemplo, supongamos que el Vástago se llamaría 002_Pieza1 y respetivamente el Muelle sería 002_Pieza2.

En la vida real esta codificación genera conflicto. Cuando las piezas no son las mismas entre subensamblajes no hay problema: cada pieza tiene su propio código. En cambio, se entra en conflicto cuando distintos subensamblajes comparten código.

No tiene sentido que dos piezas iguales, como es el caso de los muelles, tengan dos nombres: 001_Pieza2 y 002_Pieza2. Es decir, para buscar el producto en una base de datos como el ejemplo citado anteriormente (NAV), ¿Cuál se pondría?

Para evitar entrar en conflicto con duplicidad de códigos, la solución propuesta es la siguiente
Tabla 2.:

Tabla 2 Ejemplo codificación piezas y subconjuntos

CÓDIGO	DESCRIPCIÓN	UNIDADES	SUBCONJUNTO
002	BANCADA	1	A
003	VÁLVULA ADMISIÓN	1	B
004	VÁLVULA ESCAPE	2	A,B
005	MUELLE	2	A,B
006	TUERCA VÁLVULA M10	2	A,B
007	RETENEDOR DE MUELLE DE VÁLVULA	2	A,B

La “Válvula de Admisión” es un subconjunto con código “A”. Este está formado por las piezas: 002, 004, 005, 006 y 007.

De igual modo, la “Válvula de Escape” es un subconjunto con código “B”. Este está formado por las piezas: 003, 004, 005, 006 y 007.

De este modo si se quiere hacer un pedido de las dos válvulas basta con decir que se necesita un código A y B o una unidad de los códigos 002, 003 y dos unidades de los códigos 004, 005, 006 y 007.

Establecido el método de codificación, se adjuntan a continuación en las tablas 3 y 4 el registro usado de los códigos con sus respectivas descripciones de las piezas y unidades.

Tabla 3 Códigos de los subconjuntos

CÓDIGO	DESCRIPCIÓN	UNIDADES
A	VÁLVULA ADMISIÓN	1
B	VÁLVULA ESCAPE	1
C	CONJUNTO BALANCÍN	1
D	MOTOR	1

Tabla 4 Códigos de las piezas

CÓDIGO	DESCRIPCIÓN	UNIDADES	SUBCONJUNTO
001	BANCADA	1	--
002	VÁLVULA ADMISIÓN	2	A
003	VÁLVULA ESCAPE	3	B
004	MUELLE	4	A,B
005	TUERCA VÁLVULA M10	5	A,B
006	RETENEDOR DE MUELLE DE VÁLVULA	6	A,B
007	TAPÓN VÁLVULA	7	A,B
008	BALANCÍN	8	C
009	EJE DEL BALANCÍN	9	C
010	SUJECIÓN BALANCÍN-EJE	10	C
011	SOPORTE BALANCÍN	11	C
012	ÁRBOL DE LEVAS	12	--
013	SOPORTE ÁRBOL DE LEVAS	13	--

014	Parte trasera MOTOR	14	D
015	Parte delantera MOTOR	15	D
016	Parte central MOTOR	16	D
017	Bobina y Eje MOTOR	17	D
018	Polea MOTOR	18	D
019	Tapa Polea MOTOR	19	D
020	Soporte regleta MOTOR	20	D
021	Regleta MOTOR	21	D
022	Soporte L MOTOR	22	--
023	Tuerca anclaje soporte L MOTOR	23	--
024	Tuerca anclaje soportes ÁRBOL DE LEVAS	24	--
025	Tornillo fijación soporte L trasero con MOTOR	25	--
026	Tornillo fijación soporte L delantero con MOTOR	26	--
027	Tuerca anclaje soporte L con MOTOR	27	--
028	Tornillo sujeción Balancín	28	C
029	CORREA TRAPEZOIDAL	29	--
030	Tronillo interno MOTOR	30	D
031	Arandela MOTOR	31	D
032	POLEA NORMALIZADA (i=3)	32	--
033	COJINETES / CASQUILLOS	33	--
034	GUÍA VÁLVULAS	34	--

3.2.6. Materiales, Procesos de Fabricación y Tratamientos Térmicos.

3.2.6.1. Materiales

En la siguiente tabla 5, se muestran los materiales de cada uno de los componentes de la maqueta. Estas se han podido obtener gracias a:

- Previo conocimiento por parte de la co-directora del proyecto.
- Los conocimientos de las asignaturas *Enginyeria dels Materials* y *Processos de Fabricació*.
- Especificaciones de los fabricantes y proveedores de las piezas.

Tabla 5 Materiales, Procesos de Fabricación, Tratamientos térmicos y proveedores

CÓDIGO	SUBCONJUNTOS	DESCRIPCIÓN	MATERIAL
1	--	BANCADA	Acero Inoxidable (AISI 304)
2	A	VÁLVULA ADMISIÓN	Hierro cementado (200º-400º)
3	B	VÁLVULA ESCAPE	Hierro cementado (600º-800º)
4	A,B	MUELLE	Acero Helicoidal
5	A,B	TUERCA VÁLVULA M10	Acero Inoxidable (AISI 304)
6	A,B	RETENEDOR DE MUELLE DE VÁLVULA	Hierro Gris/Fundición Gris
7	A,B	TAPÓN VÁLVULA	Acero Inoxidable (AISI 304)
8	C	BALANCÍN	Hierro Gris/Fundición Gris + Tratamiento Térmico (<i>Temple superficial por nitruración</i>)
9	C	EJE DEL BALANCÍN	Acero Inoxidable (AISI 304)
10	C	SUJECCIÓN BALANCÍN-EJE	Hierro dúctil
11	C	SOPORTE BALANCÍN	Hierro Gris/Fundición Gris + Tratamiento Térmico

			(Nitrocarburation ferrítica)
12	--	ÁRBOL DE LEVAS	Hierro fundido + Tratamiento Térmico (<i>Temple superficial por nitruración</i>)
13	--	SOPORTE ÁRBOL DE LEVAS	Acero Inoxidable (AISI 304) + Tratamiento Térmico (<i>Nitrocarburation ferrítica</i>)
14	D	Parte trasera MOTOR	Hierro fundido
15	D	Parte delantera MOTOR	Hierro fundido
16	D	Parte central MOTOR	Hierro fundido
17	D	Bobina y Eje MOTOR	Acero Inoxidable (AISI 304) + Cu
18	D	Polea MOTOR	Acero Inoxidable (AISI 304)
19	D	Tapa Polea MOTOR	Chapa de Acero Inoxidable (AISI 304)
20	D	Soporte regleta MOTOR	Chapa de Acero Inoxidable (AISI 304)
21	D	Regleta MOTOR	Plástico
22	--	Soporte L MOTOR	Chapa de Acero Inoxidable (AISI 304)
23	--	Tuerca anclaje soporte L MOTOR	Acero Inoxidable (AISI 304)
24	--	Tuerca anclaje soportes ÁRBOL DE LEVAS	Acero Inoxidable (AISI 304)
25	--	Tornillo fijación soporte L trasero con MOTOR	Acero Inoxidable (AISI 304)
26	--	Tornillo fijación soporte L delantero con MOTOR	Acero Inoxidable (AISI 304)

27	--	Tuerca anclaje soporte L con MOTOR	Acero Inoxidable (AISI 304)
28	C	Tornillo sujeción Balancín	Acero Inoxidable (AISI 304)
29	--	CORREA TRAPEZOIDAL	Caucho y tejido (Nylon, Poliéster... adecuados a la norma DIN 2218)
30	D	Tronillo interno MOTOR	Acero Inoxidable (AISI 304)
31	D	Arandela MOTOR	Acero Inoxidable (AISI 304)
32	--	POLEA NORMALIZADA (i=3)	Hierro Gris/Fundición Gris
33	--	COJINETES / CASQUILLOS	Polimérico (poliamida 6)
34	--	GUÍAS VALVULAS ADMISION Y ESCAPE	Acero Inoxidable (AISI 304)

3.2.6.2. Procesos de Fabricación y Tratamientos Térmicos

3.2.6.2.1 Proceso de fabricación

- **Mecanizado**

El mecanizado es un proceso de fabricación mediante el cual se consigue una pieza con forma y tamaño adecuado, el cual se basa en la eliminación del material mediante un conjunto de operaciones.

Torno: El mecanizado por torno es una de las herramientas más extendidas en los procesos de fabricación. El principio es que la pieza se fija en un torno que va rotando con una velocidad constante y mediante una herramienta de corte estática se consigue eliminar el material con precisión.

Fresadora: Contrario al torno, en la fresadora la pieza a la cual se le desea dar forma se encuentra fijada sobre una base y la herramienta de corte es la que se mueve a una velocidad elevada, es decir, el corte es producido a medida que se realiza el movimiento.

- **Fundición**

La técnica de fundición consigue que el material base se eleve hasta una temperatura donde su estado sea líquido. Seguidamente se introduce en un molde fabricado previamente con una forma específica, el material se solidifica y como resultado final se obtiene la pieza con la forma deseada. Al contrario de la técnica de mecanizado, esta es una técnica mediante el cual se añade el material en vez eliminarlo.

- **Chapa plegada**

El plegado de chapa es un proceso mediante el cual se aprovecha la capacidad de deformación plástica de un material. El proceso parte de una prensa la cual contiene una matriz y un punzón que presionará la chapa. Al producirse el estampado se obtiene una chapa plegada con la forma deseada.

- **Conformado de Alambre**

El conformado de alambre es una técnica que aprovecha la capacidad de la deformación plástica de un material. En este caso se tiene una varilla rectilínea, la cual se le hace circular a partir de un circuito preciso que obliga al material a deformarse hasta obtener la pieza deseada.

- **Vulcanizado**

El vulcanizado es el proceso mediante el cual se calienta un material plástico pretratado (caucho, por ejemplo) en conjunto con un molde caliente y agentes químicos, como el azufre, para obtener la forma deseada del plástico y su impermeabilización.

3.2.6.2.2 Tratamientos térmicos

- **Nitruración:**

Tratamiento térmico mediante el cual se le añade a un metal una mayor composición de Nitrógeno gracias a la difusión.

Se realiza a partir de un horno gaseoso o de sales fundidas con una alta concentración del Nitrógeno.

Generalmente se utiliza para generar una cobertura de nitrógeno en la superficie de la pieza tratada y se genera una superficie con mayor dureza, resistencia a la corrosión y vida útil.

- **Carbonitruración:**

Tratamiento térmico mediante el cual se le añade a un metal una mayor composición de Nitrógeno y Carbono a la superficie de un metal.

Se obtiene una superficie con mayor dureza, resistencia a la corrosión y vida útil.

Tabla 6 Procesos de Fabricación, Tratamientos térmicos y proveedores

CÓDIGO	SUBCONJUNTOS	DESCRIPCIÓN	PROCESO DE OBTENCIÓN
1	--	BANCADA	Mecanización por torno y fresadora
2	A	VÁLVULA ADMISIÓN	Mecanización por torno y fresadora
3	B	VÁLVULA ESCAPE	Mecanización por torno y fresadora
4	A,B	MUELLE	Conformado de Alambre
6	A,B	RETENEDOR DE MUELLE DE VÁLVULA	Fundición
7	A,B	TAPÓN VÁLVULA	Mecanización por torno y fresadora
8	C	BALANCÍN	Fundición con tratamiento térmico (Nitruración)
9	C	EJE DEL BALANCÍN	Mecanización por torno y fresadora
10	C	SUJECCIÓN BALANCÍN-EJE	Conformado de Alambre
11	C	SOPORTE BALANCÍN	Fundición (Carbonitruración)
12	--	ÁRBOL DE LEVAS	Fundición con tratamiento térmico (Nitruración)
13	--	SOPORTE ÁRBOL DE LEVAS	Fundición

			(Carbonitruración)
14	D	Parte trasera MOTOR	Fundición
15	D	Parte delantera MOTOR	Fundición
16	D	Parte central MOTOR	Fundición
17	D	Bobina y Eje MOTOR	varios
18	D	Polea MOTOR	Mecanización por torno y fresadora
19	D	Tapa Polea MOTOR	Mecanización por torno y fresadora
20	D	Soporte regleta MOTOR	Chapa plegada
21	D	Regleta MOTOR	Inyección
22	--	Soporte L MOTOR	Chapa plegada
29	--	CORREA TRAPEZOIDAL	Vulcanizado
32	--	POLEA NORMALIZADA (i=3)	Fundición
33	--	COJINETES / CASQUILLOS	Vulcanizado
34	--	GUÍAS VALVULAS ADMISION Y ESCAPE	Mecanización por torno y fresadora

3.2.6.2.3 Elementos comprados normalizados

Los tornillos y las tuercas que se han usado para la elaboración de la maqueta, siguen los procesos de fabricación y los tratamientos térmicos regidos por la normativa pertinente de para cada pieza: DIN, UNE, ISO.

Tabla 7 Elementos normalizados

CÓDIGO	SUBCONJUNTOS	DESCRIPCIÓN	NORMA
5	A,B	TUERCA VÁLVULA M10	DIN 934 - M6x10mm
23	--	Tuerca anclaje soporte L MOTOR	DIN 6927 / M5x6,5mm
024	--	Tuerca anclaje soportes ÁRBOL DE LEVAS	ISO-10511 / M6x4mm
025	--	Tornillo fijación soporte L trasero con MOTOR	DIN 7984 / M3x12mm
26	--	Tornillo fijación soporte L delantero con MOTOR	DIN 7984 / M3x30mm
27	--	Tuerca anclaje soporte L con MOTOR	ISO-10511 / M3x4mm
28	C	Tornillo sujeción Balancín	DIN 609 / M8x75mm

3.2.7. Realidad de la situación

Tal como se ha comentado en apartados anteriores, las piezas que se disponían para la realización de la maqueta experimental provenían de distintos proveedores y esto ha ocasionado problemas para el avance del proyecto.

En la tabla 8 mostrada a continuación se especifican las distintas procedencias y cantidades de cada elemento. Esta información permite un mayor entendimiento de los problemas que han ido apareciendo a lo largo del proyecto.

Estos se pueden clasificar como:

- **LAB:** Piezas con acceso de la culata del modelo del laboratorio de Mecánica.
- **DIR:** Piezas proporcionadas por el director del proyecto, Leonardo Acho.
- **FAB:** Piezas no disponibles pendientes de mandar a fabricar.
- **NORM:** Piezas no disponibles pendientes de comprar (piezas normalizadas).

Tabla 8 Clasificación proveedores

CÓDIGO	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CLASIFICACIÓN PROVEEDORES			
			ES	LAB	DIR	FAB NORM
001	BANCADA	1				X
A	VÁLVULA ADMISIÓN	1		X		
B	VÁLVULA ESCAPE	1		X		
C	CONJUNTO BALANCÍN	1		X		
D	MOTOR	1			X	
012	ÁRBOL DE LEVAS	1			X	
013	SOPORTE ÁRBOL DE LEVAS	3				X
022	SOPORTE L MOTOR	2				X
029	CORREA TRAPEZOIDAL	1				X
032	POLEA	1				X
varios	TUERCAS, TORNILLOS, OTROS	varios				X

3.2.7.1. Elementos en conflicto

Gracias al ensamblaje en 3D diseñado mediante el *SolidWorks*, se empezaron a ver fallos y problemas que en un inicio no se contemplaron:

- Desconocimiento de parámetros importantes como la *Constante Elástica (K)* de los muelles que se disponían.
- La velocidad de giro mínima del Árbol de Levas para que pudiese comprimir el muelle, objeto de estudio.
- Comprar la Polea y Correa Normalizadas que pudieran hacer la correcta relación de transmisión con el motor.
- Las distancias mínimas y máximas del Motor y la Polea para una correcta tensión con la Correa trapezoidal.
- Como el Árbol de Levas y el Conjunto del Balancín provienen de distintos proveedores, es decir, no están diseñados para el mismo modelo, las Levas no colisionan en el centro de los Balancines. Esto puede afectar a las fuerzas generadas por la leva sobre el Balancín que acabará afectando al desplazamiento lineal de las Válvulas.

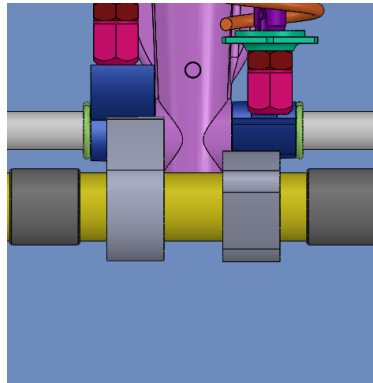


Figura 3-68 Problemática del Balancín con el Árbol de Levas (Fuente: Fotografía propia)

- Aparición de elementos que no se tuvieron en cuenta inicialmente, pero que eran imprescindibles:
 - Casquillos entre el Árbol de Levas y sus Soportes para permitir el correcto movimiento rotativo entre ellos.
 - Aceites o Lubricantes para el mecanismo
- Altos presupuestos para el elemento principal a fabricar, la Bancada.
Se contemplaba como factor de seguridad hacer una segunda Bancada en caso de fallar la primera, pero algunos proveedores no contestaron ni correos ni llamadas y otros tenían plazos de entrega que se consideraron largos para el tiempo del que se disponía. Estos factores fueron básicos y determinaron el rumbo que debía tomar el proyecto.

3.2.7.2. Decisiones Tomadas

Después de muchas reuniones con los directores del proyecto estudiando e intentando resolver la situación, fue cuando realmente se vio reflejada la magnitud del *TFG* y se decidió que para su abastecimiento no se realizaría una maqueta física sino una simulación de esta con la ayuda del complemento de *Motion* del *SolidWorks* y posteriormente del *Simulink* del *MATLAB*.

Referente a la fabricación de la maqueta física, se decidió dejarla pendiente como un proyecto conjunto con el director del trabajo después del *TFG*.

En los apartados siguientes se detallarán las simulaciones hechas con dicho programa, sus resultados y conclusiones.

3.3. Elaboración de un modelo dinámico simplificado al mecanismo de apertura y cierre de una válvula en motores de combustión interna.

Al tomar la decisión de cambiar el rumbo del proyecto, es decir, realizar el estudio de manera virtual, se estableció que la herramienta que se usaría fuese el “*SolidWorks Motion*”.

El programa *SolidWorks* tiene un complemento llamado *Motion*, el cual tiene dos funciones principales: La Animación y el Análisis de movimiento. Para este proyecto, se necesita la segunda opción.

Este puede simular y analizar con precisión el movimiento de un ensamblaje a la vez que se pueden implementar al sistema motores, fuerzas, resortes, amortiguadores, contactos y fricción.

Finalmente, en caso de ser necesario también cuenta con restricciones de movimiento, las propiedades de materiales, la masa y los contactos entre componentes.

Una vez parametrizado el sistema, el programa realiza los cálculos pertinentes por el *solver* cinemático, el cual permite mostrar resultados mediante gráficos.

3.3.1. Simulaciones *Motion* Maqueta

Tal como se muestra en los cálculos del Anexo, los parámetros calculados para la simulación son los siguientes:

- Velocidad del Motor: 12.000 rpm
- Relación de Transmisión (i): 3
- Velocidad del Árbol de Levas: 4.000 rpm
- Constante de Elasticidad del Muelle (K): 28.850 N/m

Aplicando la simulación con estos parámetros y estudiando el desplazamiento lineal de la Válvula de Admisión respecto de la Bancada, se obtuvieron los resultados del siguiente gráfico:

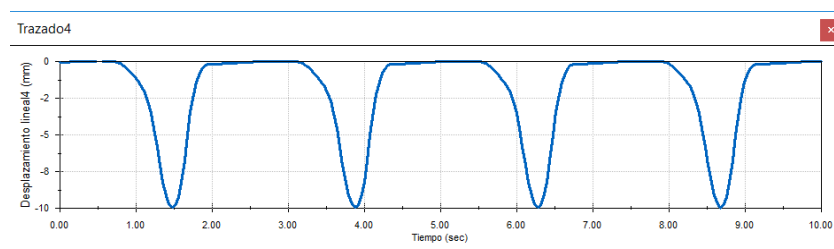


Figura 3-69 Velocidad de giro del Motor (Fuente: Fotografía propia)

Inicialmente se pretendía hacer la simulación con el *Motion* en el Ensamblaje ya que la primera simulación obtenida muestra un gráfico correcto a primera vista. No obstante, debido a los problemas relatados a continuación, se decidió diseñar un Modelo Simple, es decir, un sistema más sencillo en el que realizar los ensayos:

- Se dudaba que la veracidad dinámica para que la Polea y la Correa hicieran correctamente la relación de transmisión ($i=3$). También se esperaba que la velocidad fuera lo más constante posible.

Para verificarlo se añadió el parámetro Motor de 12.000 rpm al Motor, esperando que la velocidad angular del Árbol de Leva fuera de 4.000 rpm y se dio a calcular.

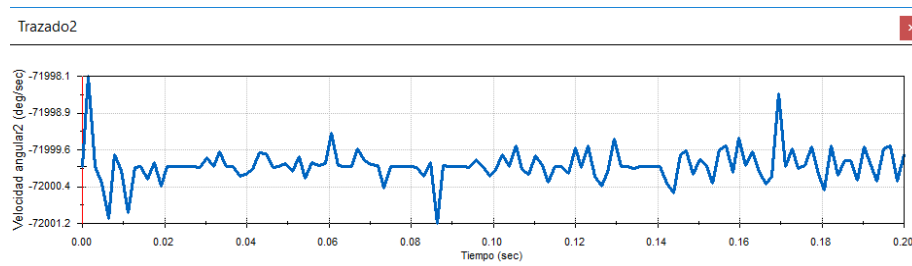


Figura 3-70 Velocidad de giro del Motor (Fuente: Fotografía propia)

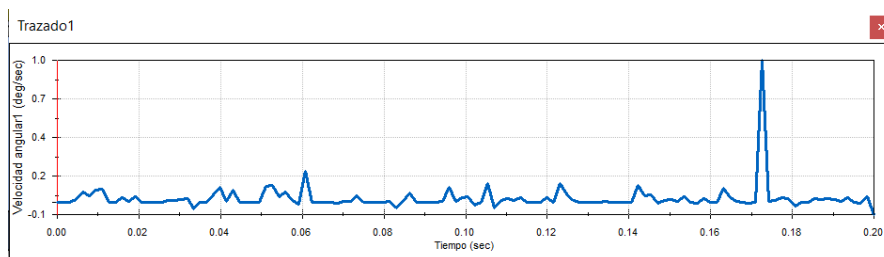


Figura 3-71 Velocidad de giro del Árbol de Levas (Fuente: Fotografía propia)+

Teniendo en cuenta que $1 \text{ rpm} = 6 \text{ deg/sec}$, en la primera gráfica, aunque no sea constante podemos ver que cumple correctamente: $71.000 \text{ deg/sec} = 11.833,33 \text{ rpm}$.

Sí vamos a la segunda gráfica: $0,05 \text{ deg/sec} = 0,00833 \text{ rpm}$, es decir, la relación de transmisión no se realiza correctamente.

- El programa constantemente daba errores o se cerraba inesperadamente ya que le costaba mucho tiempo calcular la simulación. Para calcular 0,1 segundos podía tardar tranquilamente de 8 a 15 minutos. Esto era debido principalmente a las Tramas por segundo, pero era necesario no modificar el valor porque si no se perdía resolución de los resultados.

3.3.2. Elaboración de un Modelo Simple

Para poder simular el Modelo Simple, se utilizan dos elementos ya reproducidos anteriormente en *SolidWorks*, que son la Leva y la Válvula de Admisión a excepción del Muelle. Se simula la Bancada mediante la pieza cilíndrica representada en azul en la siguiente Figura 3-72, esta debe de estar fija en el sistema.

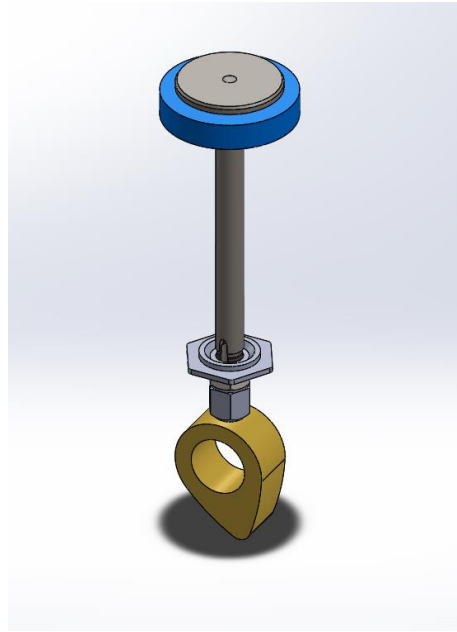


Figura 3-72 Modelo Simple (Fuente: Fotografía propia)

Para acceder al complemento *Motion*, hay que ir a la pestaña “Estudio del movimiento” situada en la parte inferior. A continuación, se muestra la interface que te permite acceder al Análisis del Movimiento.

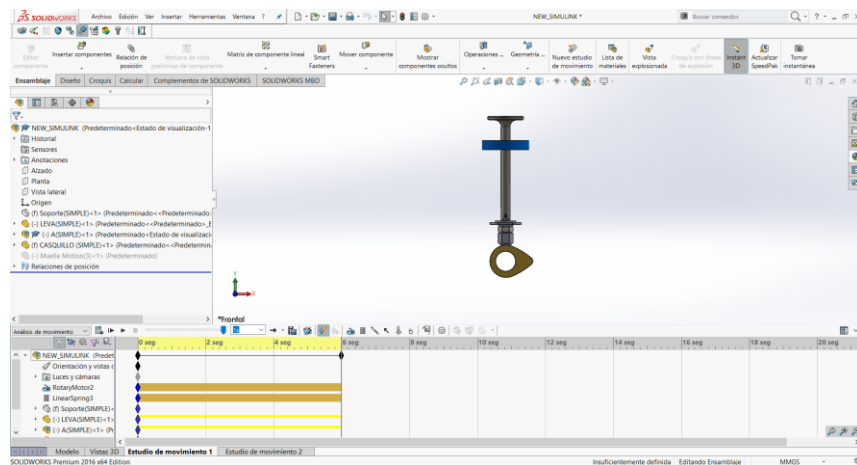


Figura 3-73 Interfaz motion con Modelo Simple

Gracias a los componentes del programa, para que la simulación funcione se tienen que añadir tres parámetros: el Tiempo de simulación, el Motor, el Muelle y las Tramas por segundo.

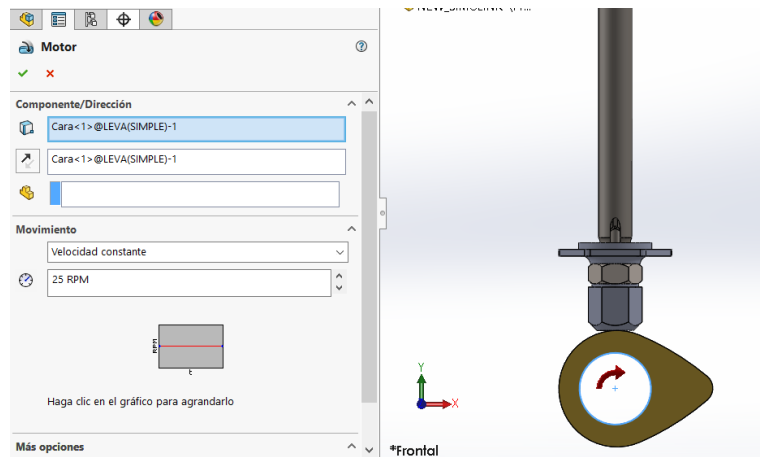


Figura 3-74 Detalle interfaz Modelo Simple (Fuente: Fotografía propia)

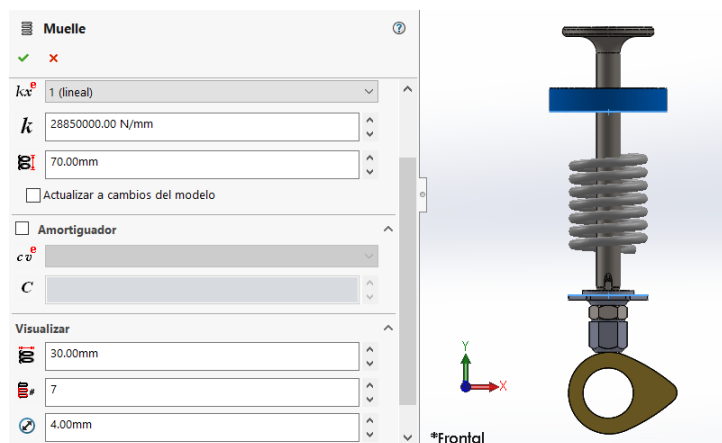


Figura 3-75 Detalle 2 interfaz Modelo Simple (Fuente: Fotografía propia)

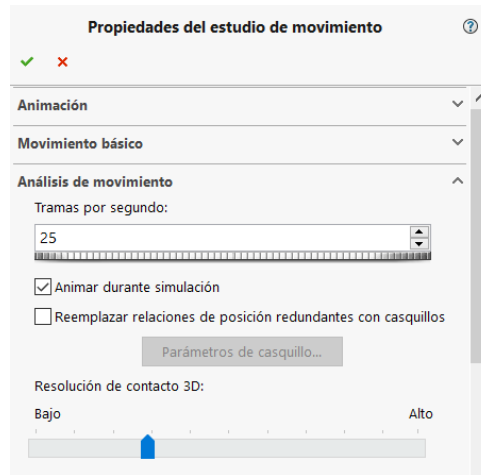


Figura 3-76 Parámetros Motion

Una vez añadidos los parámetros, se tiene que activar el icono de Calcular. Es importante asegurarse que se está en modo Análisis de Movimiento y no en Animación porque si no, no se podrán visualizar los resultados.

Los parámetros establecidos para obtener el resultado no han sido al azar, sino que se han realizado muchas iteraciones hasta dar con la combinación que menos interferencia diera en el resultado y que a la vez mostrara dos períodos claramente como mínimo.

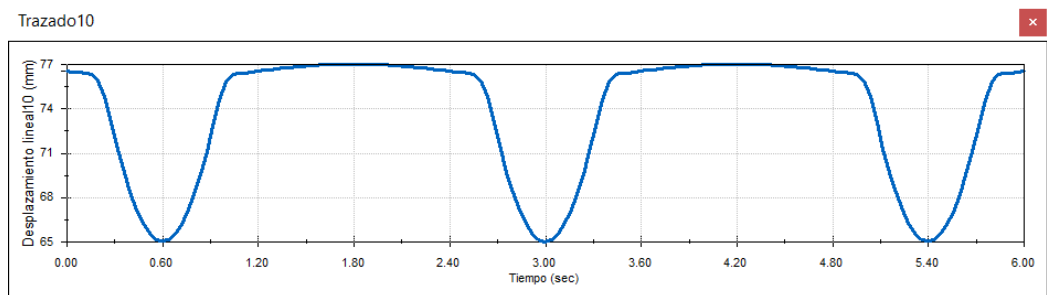


Figura 3-77 Señal optimizada del Modelo Simple (Fuente: Fotografía propia)

Esta es la gráfica envolvente del perfil de leva modelizado que se ha obtenido al estudiar el Desplazamiento Lineal (mm) de la Válvula de Admisión con respecto a la Bancada modelizada en función del tiempo (s).

A continuación, se muestra el mismo proceso, pero con los valores que previamente se han calculado para la maqueta:

- Velocidad del Motor: 4.000 rpm
- Constante elástica del Muelle: 28.850 N/m

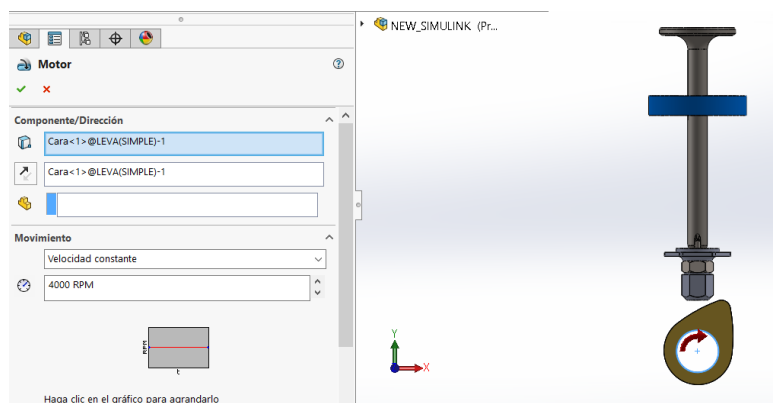


Figura 3-78 Detalle 1 interfaz Modelo Simple con optimización(Fuente: Fotografía propia)

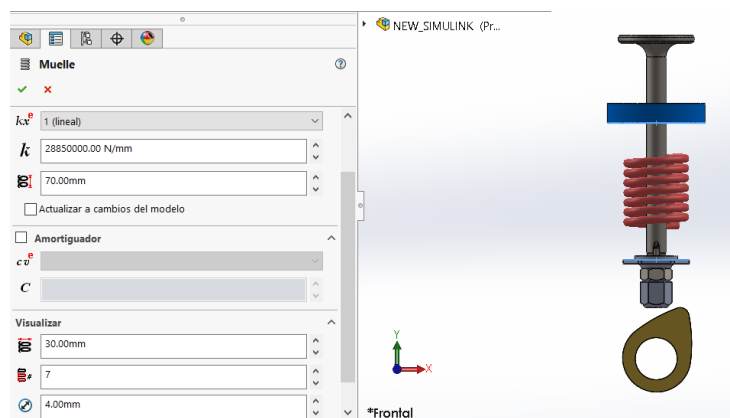


Figura 3-79 Detalle 2 interfaz Modelo Simple con optimización(Fuente: Fotografía propia)

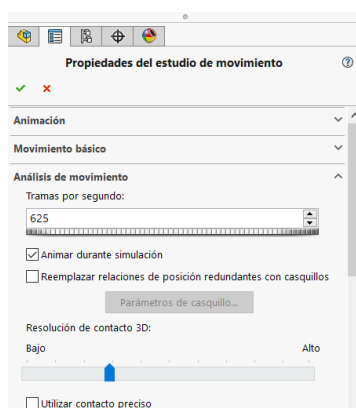


Figura 3-80 Detalle 3 interfaz Modelo Simple con optimización(Fuente: Fotografía propia)

Modificando los componentes del programa: el Tiempo de simulación, el Motor, el Muelle y las Tramas por segundo, se obtiene:

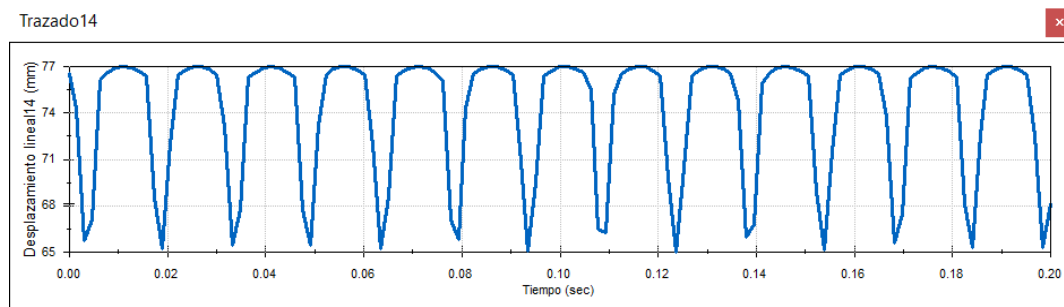


Figura 3-81 Señales del Modelo Simple (Fuente: Fotografía propia)

Obtenida la gráfica solamente se tenía que ir cambiando la Constante elástica del Muelle (K) y observar el comportamiento dinámico del Muelle. Lamentablemente el ensayo no funcionó ya que por mucho que se cambiaran los parámetros del Muelle, del Motor o incluso de Material, siempre se obtiene la misma gráfica. Se ha llegado a la conclusión que el ensayo cinemático se ha hecho correctamente mientras que el dinámico no ha sido congruente.

Llegados a este punto no se quiso desaprovechar todo el trabajo logrado de la simulación con el *SolidWorks* así que se decidió dar un último rumbo al TFG, el definitivo: usar los datos obtenidos del *Motion* e introducirlos en el complemento *Simulink* del *MATALB*.

Estos valores se usarán para generar un modelo de referencia a programar con el *Simulink* que permitirá el desarrollo de un sistema eficiente de detección de fallos en el desgaste del muelle y satisfacer el objetivo principal del TFG.

Como la segunda señal obtenida (ver figura 3-81 no muestra datos suficientes, para el modelo matemático se van a usar los valores de la primera gráfica (figura 3-77).

3.3.3. Procesado de señales

3.3.3.1. Señal empleada para la explicación del Modelo Matemático

Partiendo del esquema mostrado en la figura 3-88, se propone como modelo del perfil de levas los datos proporcionados por Leonardo Acho, el director del TFG.

El objetivo es ver la funcionalidad del esquema de detección de fallos del muelle que se propone.

Los valores aplicados son:

Tabla 9 Valores aplicados (Fuente: Valores propios)

s (mm)	$\Theta(^{\circ})$	s (mm)	$\Theta(^{\circ})$	s (mm)	$\Theta(^{\circ})$	s (mm)	$\Theta(^{\circ})$
0	0	0,500	90	1	180	0,091	270
0	10	0,663	100	0,996	190	0,029	280
0	20	0,804	110	0,971	200	0,004	290
0	30	0,909	120	0,909	210	0	300
0,004	40	0,971	130	0,804	220	0	310
0,029	50	0,996	140	0,663	230	0	320
0,091	60	1	150	0,500	240	0	330
0,196	70	1	160	0,337	250	0	340
0,337	80	1	170	0,196	260	0	350

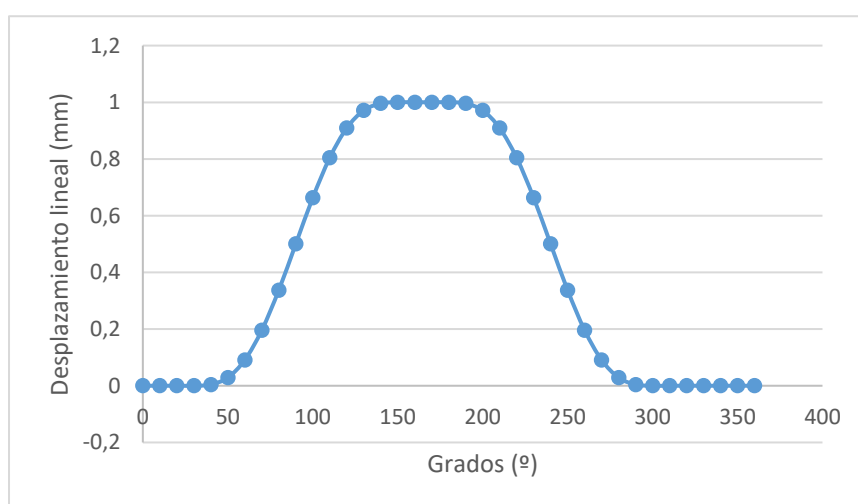


Figura 3-82 Gráfico Señal ideal (Fuente: Fotografía propia)

La manera de añadirlos al *Simulink* es la siguiente:

EjeY:[0;0;0;0;0.004;0.029;0.091;0.196;0.337;0.500;0.663;0.804;0.909;0.971;0.996;1;1;1;1;0.996;0.971;0.909;0.804;0.663;0.500;0.337;0.196;0.091;0.029;0.004;0;0;0;0;0;0]

EjeX:[0;10;20;30;40;50;60;70;80;90;100;110;120;130;140;150;160;170;180;190;200;210;220;230;240;250;260;270;280;290;300;310;320;330;340;350;360]

3.3.3.2. Señal empleada para la explicación del Modelo Matemático

Para poder implementar los datos en el programa *Simulink*, se han tenido que procesar las señales obtenidas del *Motion*.

Principalmente, los datos obtenidos por el archivo .CVS de las gráficas del *Motion* son de $s(\text{mm})$ vs. $t(\text{s})$ y en cambio las que se han de añadir al *Simulink* son de $s(\text{mm})$ vs. $\Theta(^{\circ})$.

El primer paso es pasar los datos del .CVS al programa *Excel* y dividirlos por celdas. Seguidamente se han de dividir entre 100 los Desplazamientos Lineales (mm), requisito del *Simulink* para que el programa no de error.

Tabla 10 Valores obtenidos por Motion en .CVS (Fuente: Valores propios)

.CVS	Tiempo (s)	Desplazamiento lineal (mm)	Desplazamiento lineal (mm)/100	Grados ($^{\circ}$)
0.6,64.8915261735551	0,6	64,89152617	0,648915262	0
0.64,65.0101301346056	0,64	65,01013013	0,650101301	6
0.68,65.3977967530485	0,68	65,39779675	0,653977968	12
0.72,66.0502787198236	0,72	66,05027872	0,660502787	18
0.76,66.9604272426422	0,76	66,96042724	0,669604272	24
0.8,68.1182706323749	0,8	68,11827063	0,681182706	30

0.84,69.5111232907913	0,84	69,51112329	0,695111233	36
0.88,71.1237162965129	0,88	71,1237163	0,711237163	42
0.92,72.938345114851	0,92	72,93834511	0,729383451	48
0.96,74.7695523265185	0,96	74,76955233	0,747695523	54
1,75.9881849099619	1	75,98818491	0,759881849	60
1.04,76.5243878584151	1,04	76,52438786	0,765243879	66
1.08,76.5890754704271	1,08	76,58907547	0,765890755	72
1.12,76.6405321432729	1,12	76,64053214	0,766405321	78
1.16,76.6931844320358	1,16	76,69318443	0,766931844	84
1.2,76.7464562762013	1,2	76,74645628	0,767464563	90
1.24,76.7997640156629	1,24	76,79976402	0,76799764	96
1.28,76.8525235997078	1,28	76,8525236	0,768525236	102
1.32,76.9041569838401	1,32	76,90415698	0,76904157	108
1.36,76.9540984629519	1,36	76,95409846	0,769540985	114
1.4,77.0018008693209	1,4	77,00180087	0,770018009	120
1.44,77.0467415667108	1,44	77,04674157	0,770467416	126
1.48,77.0884281741162	1,48	77,08842817	0,770884282	132
1.52,77.1264039627712	1,52	77,12640396	0,77126404	138
1.56,77.1602528609348	1,56	77,16025286	0,771602529	144
1.6,77.1896040124623	1,6	77,18960401	0,77189604	150
1.64,77.2141358399502	1,64	77,21413584	0,772141358	156

1.68,77.2335795680296	1,68	77,23357957	0,772335796	162
1.72,77.2477221681209	1,72	77,24772217	0,772477222	168
1.76,77.2564086924286	1,76	77,25640869	0,772564087	174
1.8,77.2595439711201	1,8	77,25954397	0,77259544	180
1.84,77.2570936524444	1,84	77,25709365	0,772570937	186
1.88,77.2490845809546	1,88	77,24908458	0,772490846	192
1.92,77.2356045045783	1,92	77,2356045	0,772356045	198
1.96,77.2168011132408	1,96	77,21680111	0,772168011	204
2,77.1928804207105	2	77,19288042	0,771928804	210
2.04,77.1641045074853	2,04	77,16410451	0,771641045	216
2.08,77.1307886493878	2,08	77,13078865	0,771307887	222
2.12,77.0932978633387	2,12	77,09329786	0,770932979	228
2.16,77.0520429079174	2,16	77,05204291	0,770520429	234
2.2,77.0074757804866	2,2	77,00747578	0,770074758	240
2.24,76.9600847661078	2,24	76,96008477	0,769600848	246
2.28,76.9103890894346	2,28	76,91038909	0,769103891	252
2.32,76.858933226007	2,32	76,85893323	0,768589332	258
2.36,76.8062809368345	2,36	76,80628094	0,768062809	264
2.4,76.7530090917188	2,4	76,75300909	0,767530091	270
2.44,76.6997013489601	2,44	76,69970135	0,766997014	276
2.48,76.6469417605212	2,48	76,64694176	0,766469418	282

2.52,76.5953082715651	2,52	76,59530827	0,765953083	288
2.56,76.5428762646325	2,56	76,54287626	0,765428763	294
2.6,76.0909299754424	2,6	76,09092998	0,7609093	300
2.64,74.9554856652951	2,64	74,95548567	0,749554857	306
2.68,73.1742519585309	2,68	73,17425196	0,73174252	312
2.72,71.3359564564315	2,72	71,33595646	0,713359565	318
2.76,69.697556108845	2,76	69,69755611	0,696975561	324
2.8,68.2768600442936	2,8	68,27686004	0,6827686	330
2.84,67.0894355307996	2,84	67,08943553	0,670894355	336
2.88,66.1482923706574	2,88	66,14829237	0,661482924	342
2.92,65.4637419579373	2,92	65,46374196	0,65463742	348
2.96,65.0432843509885	2,96	65,04328435	0,650432844	354
3,64.8915261735471	3	64,89152617	0,648915262	360

Con este proceso se obtiene la misma señal que el *Motion* pero en el *Excel*.

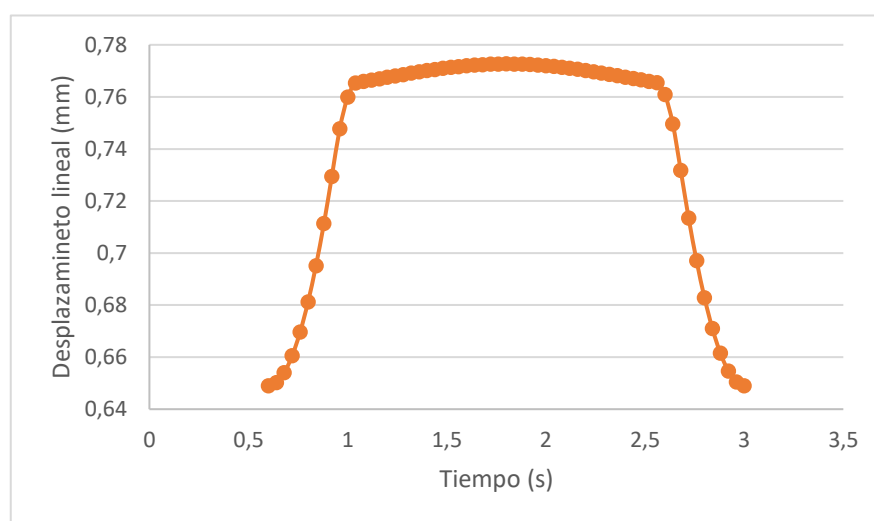


Figura 3-83 Gráfico tiempo-desplazamiento obtenido por Motion en .CVS (Fuente: Fotografía propia)

Llegados a este punto, se sigue con el mismo problema, se han de pasar el tiempo (s) a grados (°). Para ello simplemente se hace una regla de tres. Sabiendo que tenemos 60 celdas y que en total son 360 grados, se divide $360/60$ y se obtiene que la relación es de 6 grados:

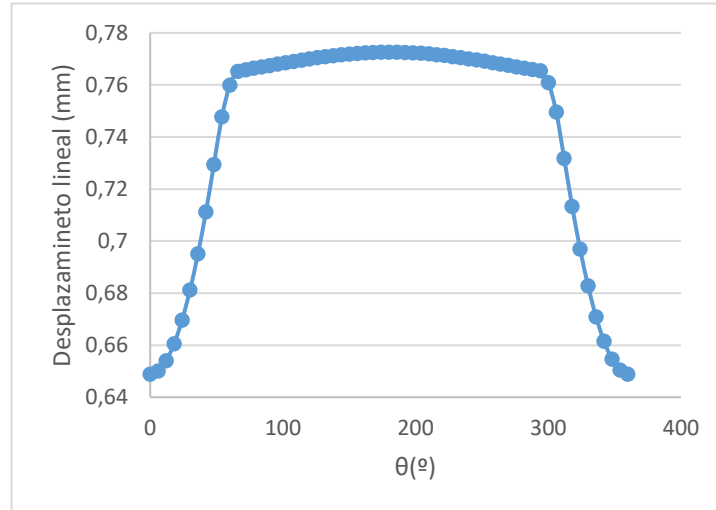


Figura 3-84 Gráfico ángulo-desplazamiento obtenido por Motion en .CVS (Fuente: Fotografía propia)

Para seguir con el mismo modelo que se ha usado de ejemplo en el Modelo Matemático del *Simulink*, los valores preestablecidos de los grados empiezan en 0 y van de 10 en 10 hasta llegar a 360°. Para obtener el mismo resultado hay que interpolar los valores del Desplazamiento Lineal.

Para ello se usan los siguientes comandos del *MATLAB*:

$$x1 = \text{linspace}(0,360,37) \rightarrow$$

Se genera una fila que va de 0 a 360 en 37 intervalos, es decir, [0,10,20 ... 360]

$$yi = \text{interp1}(zz(:,2), zz(:,1), x1, 'linear')$$

Usando las columnas de la Tabla 11. Valores obtenidos por *Motion* en .CVS (Fuente: Fotografía propia)

$$zz(:,1) = s(\text{mm})$$

$$zz(:,2) = \theta(^{\circ})$$

Finalmente se obtiene:

Tabla 11 Valores obtenidos por Motion en .CVS (Fuente: Valores propios)

yi (mm)	yi/100	xi (º)
64,8915262	0,64891526	0
65,2685745	0,65268575	10
66,3536616	0,66353662	20
68,1182706	0,68118271	30
70,5861853	0,70586185	40
73,5487475	0,73548748	50
75,9881849	0,75988185	60
76,5675129	0,76567513	70
76,6580829	0,76658083	80
76,7464563	0,76746456	90
76,8349371	0,76834937	100
76,9208041	0,76920804	110
77,0018009	0,77001801	120
77,0745326	0,77074533	130
77,1376869	0,77137687	140
77,189604	0,77189604	150
77,2270983	0,77227098	160
77,2506177	0,77250618	170
77,259544	0,77259544	180
77,2517543	0,77251754	190
77,2293367	0,77229337	200
77,1928804	0,7719288	210
77,1418939	0,77141894	220

77,0795462	0,77079546	230
77,0074758	0,77007476	240
76,9269543	0,76926954	250
76,8413825	0,76841382	260
76,7530091	0,76753009	270
76,6645283	0,76664528	280
76,5778309	0,76577831	290
76,09093	0,7609093	300
73,7679965	0,73767997	310
70,789823	0,70789823	320
68,27686	0,6827686	330
66,4620068	0,66462007	340
65,3235894	0,65323589	350
64,8915262	0,64891526	360

Finalmente, aunque no se aprecie en el nuevo gráfico obtenido en el *Excel*, se ha obtenido mediante la interpolación los valores equivalentes de los desplazamientos lineales de la escala de grados de 6 en 6 a la de 10 en 10.

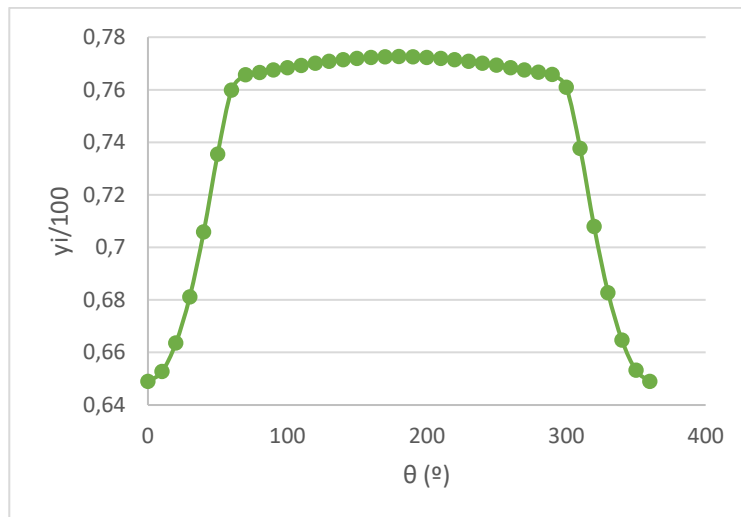


Figura 3-85 Valores interpolados (Fuente: Fotografía propia)

No obstante, queda una última modificación: Se puede observar que los valores del Eje Y obtenidos no parten de cero sino de 0,60mm. Esto es debido a dos motivos:

- La bancada simulada no está alineada con la base del vástago y por eso hay un desfase. No obstante, el incremento del desplazamiento, es decir, los valores que nos interesan, no variarán.

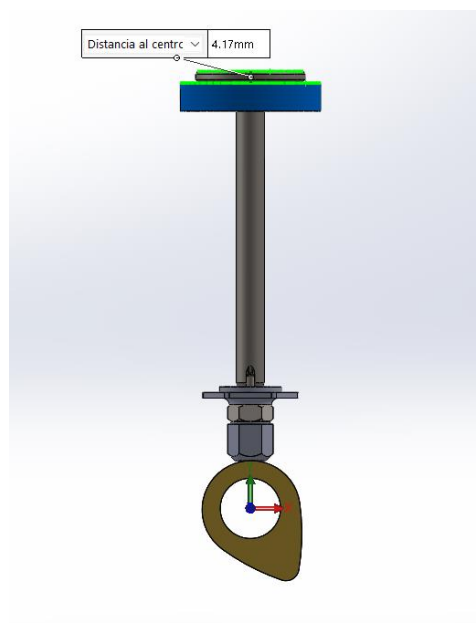


Figura 3-86 Explicación del desfase del eje Y

- El programa nos avisa al hacer la simulación que como el tapón es plano no cumplirá la relación de tangencia en todos sus puntos.

Nos interesa que la señal empiece en cero. Para ello solamente se ha de restar el primer valor de “ $y_i/100$ ” a todos los valores restantes.

Tabla 12 Valores Ajustados (Fuente: Valores propios)

$y_i/100$	y_i^*	$\Theta(^{\circ})$
0,64891526	0	0
0,65268575	0,00377048	10
0,66353662	0,01462135	20
0,68118271	0,03226744	30
0,70586185	0,05694659	40
0,73548748	0,08657221	50
0,75988185	0,11096659	60
0,76567513	0,11675987	70
0,76658083	0,11766557	80
0,76746456	0,1185493	90
0,76834937	0,11943411	100
0,76920804	0,12029278	110
0,77001801	0,12110275	120
0,77074533	0,12183006	130
0,77137687	0,12246161	140
0,77189604	0,12298078	150
0,77227098	0,12335572	160
0,77250618	0,12359092	170
0,77259544	0,12368018	180

0,77251754	0,12360228	190
0,77229337	0,12337811	200
0,7719288	0,12301354	210
0,77141894	0,12250368	220
0,77079546	0,1218802	230
0,77007476	0,1211595	240
0,76926954	0,12035428	250
0,76841382	0,11949856	260
0,76753009	0,11861483	270
0,76664528	0,11773002	280
0,76577831	0,11686305	290
0,7609093	0,11199404	300
0,73767997	0,0887647	310
0,70789823	0,05898297	320
0,6827686	0,03385334	330
0,66462007	0,01570481	340
0,65323589	0,00432063	350
0,64891526	0	360

Ahora sí, se han procesado correctamente los datos:

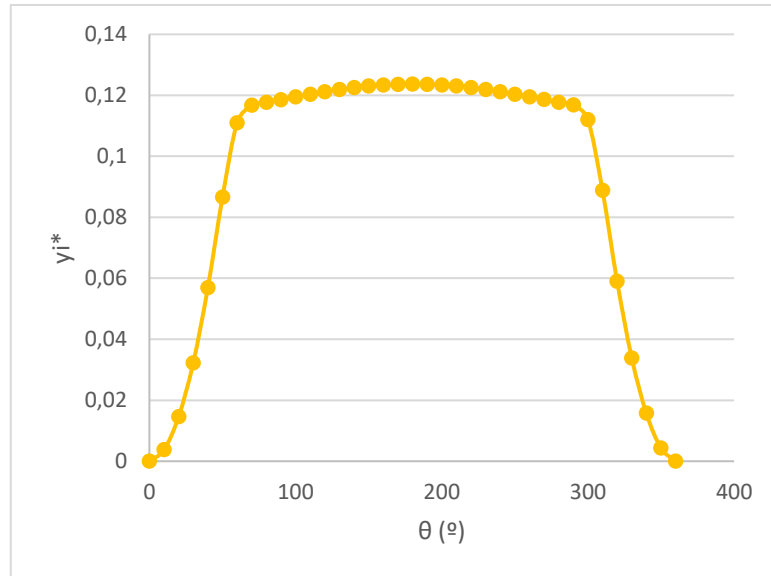


Figura 3-87 Gráfico de los valores Ajustados (Fuente: Fotografía propia)

Posteriormente se añadirán al *Simulink* es la siguiente:

EjeY:[0;0.00377048;0.01462135;0.03226744;0.05694659;0.08657221;0.11096659;0.11675987;0.11766557;0.1185493;0.11943411;0.12029278;0.12110275;0.12183006;0.12246161;0.12298078;0.12335572;0.12359092;0.12368018;0.12360228;0.12337811;0.12301354;0.12250368;0.1218802;0.1211595;0.12035428;0.11949856;0.11861483;0.11773002;0.11686305;0.11199404;0.0887647;0.05898297;0.03385334;0.01570481;0.00432063;0]

EjeX:[0;10;20;30;40;50;60;70;80;90;100;110;120;130;140;150;160;170;180;190;200;210;220;230;240;250;260;270;280;290;300;310;320;330;340;350;360]

3.4. Diseño de un modelo matemático explicativo de fatigas en muelles.

3.4.1. Explicación del Diseño del Modelo Matemático

3.4.1.1. Diseño del Modelo Matemático

En los próximos apartados se explicará paso a paso el Diseño del Modelo Matemático que se ha diseñado mediante el componente *Simulink* del programa informático *MATLAB*.

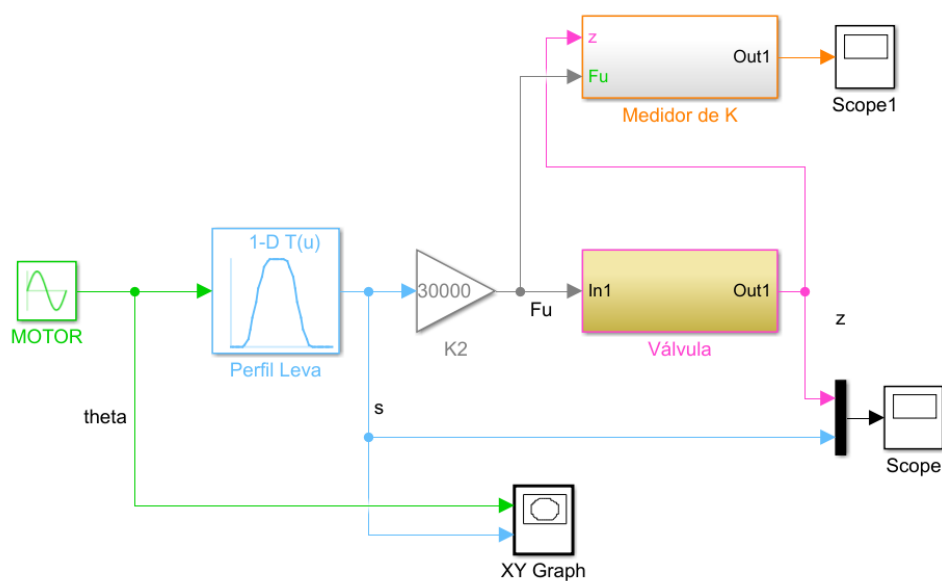


Figura 3-88 Esquema del Diseño del Modelo Matemático (Fuente: Fotografía propia)

3.4.1.2. Base Matemática

El modelo matemático más simple para analizar la dinámica de una válvula es el siguiente:

$$m \cdot \ddot{z} = F_u - 1 \cdot K \cdot z + \Delta(t) - c \cdot \dot{z}$$

Ecuación 1

donde:

$$m: \text{masa (kg)} \rightarrow m = 0.15 \text{kg}$$

$$K: \text{constante de elasticidad del muelle } \left(\frac{N}{m}\right) \rightarrow K = 29000 \approx 30000 \text{ N/m}$$

F_u : Fuerza útil

$\Delta(t)$: términos de fricción y agentes externos al sistema (ruido)

c : amortiguador (**corrector obtenido por simulación numérica proporcionado por el director del proyecto**) $\rightarrow c = 20 \text{ N} \cdot \text{s/m}$

Esta fórmula aplica la segunda Ley de Newton y se trata de una ecuación diferencial de primer orden. A continuación, se irá explicando en qué parte de los esquemas se ha ido aplicando.

3.4.1.3. Motor

Este elemento permite parametrizar la señal procedente de un motor eléctrico.

Para este diseño se han usado valores del perfil de levas ideales. Se recuerda que los valores usados, tanto los ideales para este ejemplo como los reales aplicados en apartados posteriores, se han obtenido mediante el programa de simulación *Motion*.

Sabiendo que la señal sinodal se calcula como:

$$y(t) = A \cdot \sin(\omega \cdot t)$$

Ecuación 2

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$$

Ecuación 3

$$f = \frac{1}{T}$$

Ecuación 4

donde:

A : Amplitud de la señal (m)

ω : Velocidad angular (rad/s)

f : Frecuencia (Hz)

T: Período (s)

Aplicamos los valores de partida que se han dado para la simulación, es este caso, el Motor gira a 25 rpm:

$$f = 25 \text{ rpm} \cdot \frac{2\pi}{60 \text{ s}} = 2,6179 \text{ Hz}$$

Por lo tanto,

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f = 2 \cdot \pi \cdot 2,6 \text{ rad/s}$$

Para saber la Amplitud y el *Bias*:

$$T = \frac{1}{f} \rightarrow f = \frac{1}{T} = \frac{1}{2.6179} = 0,38 \text{ s}$$

Las gráficas disponibles del perfil de levas son de Desplazamiento Lienal, “s” (mm) respecto el Tiempo (s), en cambio las que nos ofrece el *Simulink* del Motor, son de Desplazamiento Lienal (mm) vs. Grados (°).

Tal como muestra la Figura 3-89, al hacer la conversión de unos ejes a otros (s, t), obtenemos que la Amplitud en la segunda gráfica es de 180° y como no queremos valores negativos para hacer los próximos cálculos, se aplica un *Bias* de 180°.

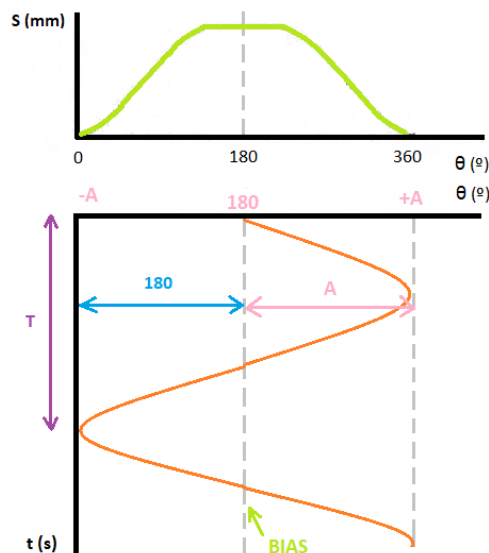


Figura 3-89 Explicación Amplitud y Bias (Fuente: Fotografía propia)

Finalmente, estos valores se añaden a “Block Parameters” del Motor y de este sale el parámetro “*theta*”.

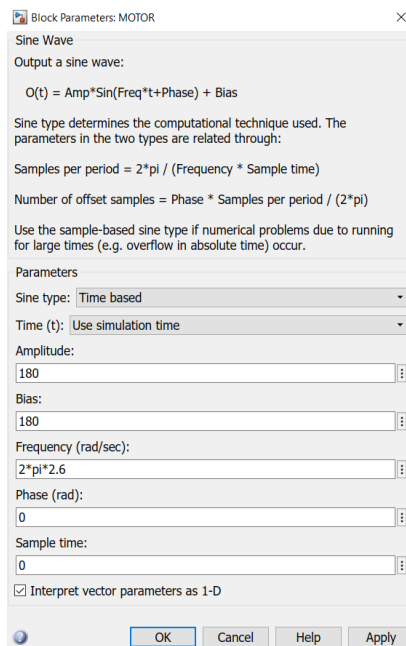


Figura 3-90 Parámetros del Motor (Fuente: Fotografía propia)

3.4.1.4. Perfil Leva

La parte más engorrosa de esta simulación es sin duda tener que poner a mano los valores del desplazamiento lineal y de los grados.

Estos tienen que introducirse entre corchetes, separarse con punto y coma, poner los decimales mediante un punto tal como muestra la figura Figura 3-91.

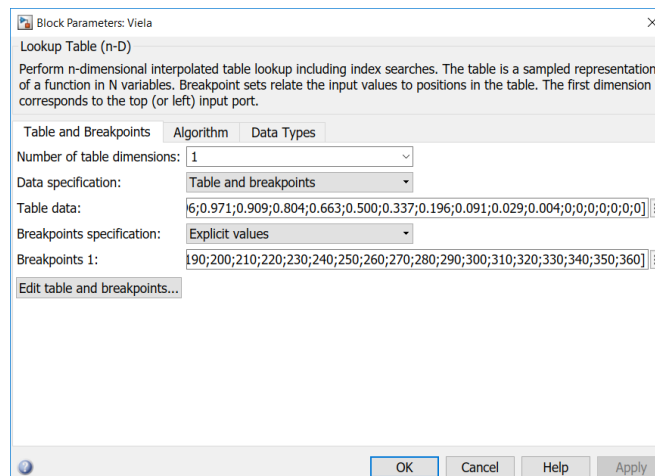


Figura 3-91 Parámetros del Motor (Fuente: Fotografía propia)

5.4.2.1.4 XY Graph

Muestra por pantalla la representación del Desplazamiento Lineal de la Leva (s) vs. Los Grados ($^\circ$) generándose el parámetro “ s ”. De este modo se puede verificar que se han introducido correctamente los valores del perfil de la leva.

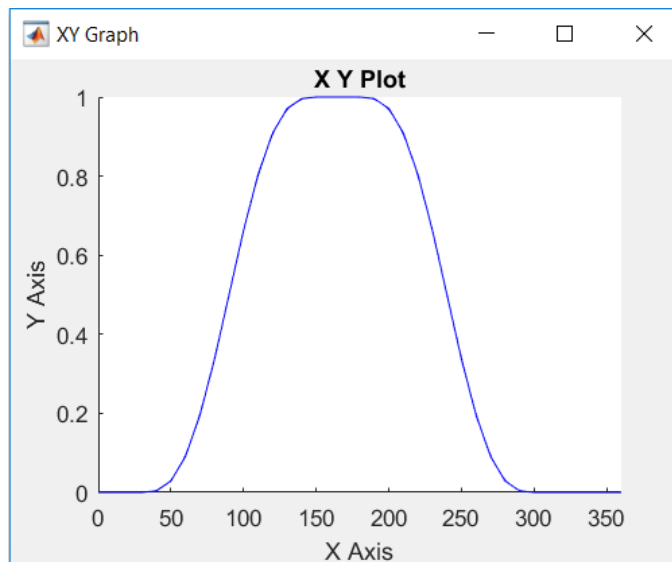


Figura 3-92 XY Graph (Fuente: Fotografía propia)

3.4.1.5. Ganancia

Al estudiar el perfil envolvente de una leva que se mueve solidariamente con el balancín, se aprecia que conforme va girando se genera una Fuerza Normal (F_N) que es perpendicular al plano mostrado el esquema de la Figura 3-93.

El mecanismo tiene una relación mecánica que hace que los elementos sean tangentes.

La fuerza que interesa es la componente (F_u) de dicha fuerza, pues es la que permite comprimir el muelle.

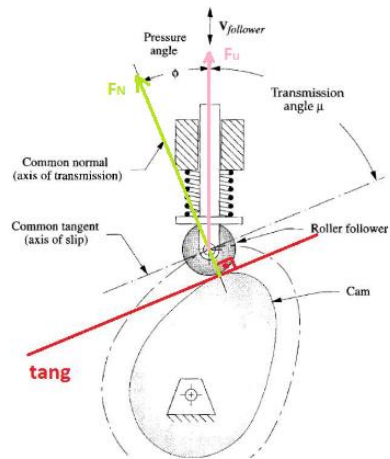


Figura 3-93 Explicación fuerzas leva-balancín (Cams Design II – Universidad Carlos III)

El icono del triángulo con los números “3000”, indica que es una operación “Gain”, es decir, un amplificador.

Retomando la Ec. 1, aplicamos:

$$\Sigma F = m \cdot a$$

Ecuación 5

Siendo $z=s$: Desplazamiento lineal (mm)

$$\dot{z} = v = \frac{ds}{dt} \left(\frac{mm}{s} \right)$$

$$\ddot{z} = a = \frac{d^2v}{dt^2} \left(\frac{mm^2}{s} \right)$$

$$m \cdot \ddot{z} = F_u - 1 \cdot K \cdot z + \Delta(t) - c \cdot \dot{z} \rightarrow m \cdot a = F_u - 1 \cdot K \cdot s - c \cdot v + \Delta(t)$$

Ecuación 6

Dónde: F_u =Fuerza útil suministrada

Como la condición para que se pueda comprimir el muelle ha de ser:

$$\Sigma F = K \cdot z$$

Ecuación 7

$$F_u \geq K \cdot z \rightarrow F_u \geq K \cdot s$$

Ecuación 8

Siendo: $K = 30000 \text{ N/m}$, véase Anexo A1.

Finalmente, mediante el *Gain*, se obtiene el parámetro “***F_u***”.

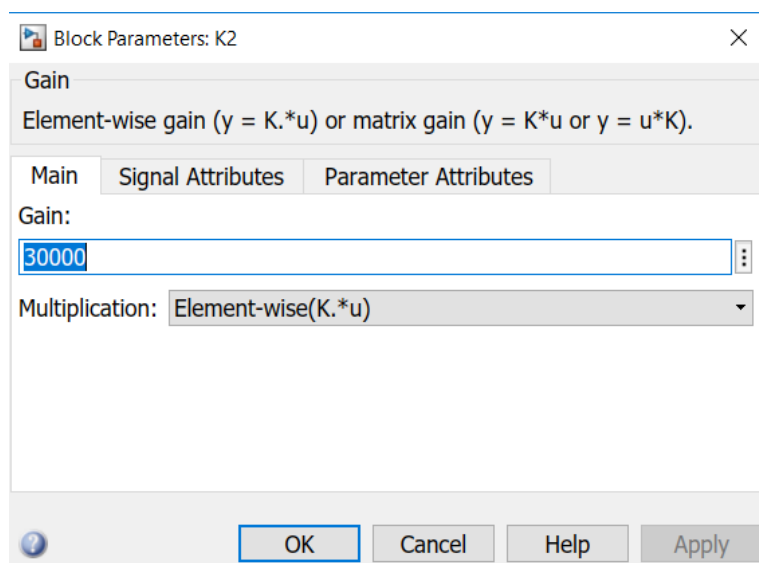


Figura 3-94 Gain (Fuente: Fotografía propia)

3.4.1.6. Modelo Válvula Dinámica

La función que se aplica en este módulo es:

$$\ddot{z} = \frac{1}{m} [Fu - K \cdot z + \Delta(t) - c \cdot \dot{z}]$$

Ecuación 9

Que viene ser la misma Ec. 1, aislando la masa al otro lado de la igualdad.

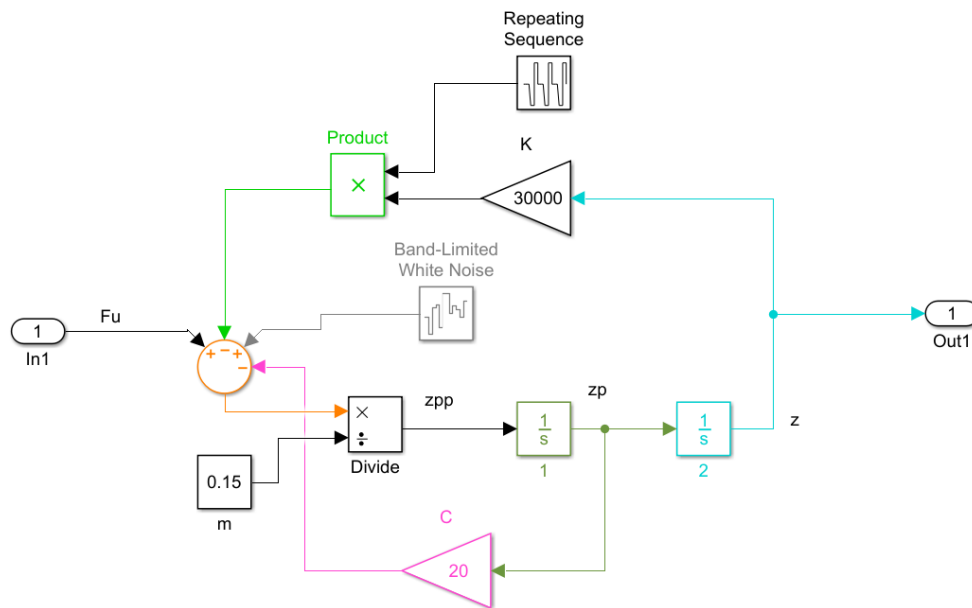


Figura 3-95 Modelo Válvula Dinámica (Fuente: Fotografía propia)

Partimos del lado izquierdo del icono *Divide*, este representa la \ddot{z} y para mayor entendimiento será el punto de partida.

Si se sigue la flecha del *Divide*, se llega a un icono llamado "1/s". El símbolo "1/s" indica que es un integrador, es decir que obtendremos el parámetro \dot{z} . Seguidamente hay una bifurcación, si seguimos rectos volvemos a tener un integrador de modo que se obtendrá z .

La segunda ruta de la bifurcación va de \dot{z} pasando por un *Gain* de 20 hasta el icono de la circunferencia que tiene en su interior "+" y "-". Este icono es un sumatorio (*Sum*) Bloque Sumador o y suma o resta los componentes dependiendo de donde nos marque la flecha. En este caso, es negativo, es decir: $-\dot{z} \cdot c$.

A la izquierda de todo tenemos un In1. Este símbolo significa que se viene de otro sistema, donde entra la variable anteriormente calculada Fuerza útil (Fu). Como tiene un “+”, significa que este elemento se sumará al resto de los enlazados en el *Sum*, es decir: **+Fu**.

En el centro del sistema se puede apreciar el icono de *Band-Limited with Noise*, este permite programar ruido en el sistema. Con este elemento, se modela en el *Sum*: **+ $\Delta(t)$** dada la ecuación Ec.9.

Los parámetros del *Band-Limited with Noise* son:

- [10] → La intensidad de la señal.
- 0,001 → Indica que cada 0,001 segundos genera un dato.
- [23341] → Semilla propuesta por el Simulink. Este parámetro es una propuesta de ruido. Si se tuviera otro *Band-Limited with Noise* en el mismo sistema se tendría que cambiar uno de ellos.

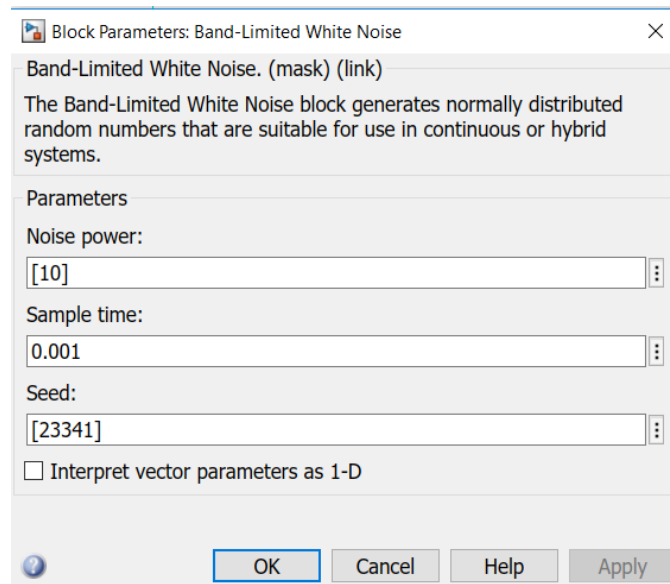


Figura 3-96 Band-Limited White Noise (Fuente: Fotografía propia)

Finalmente, para completar los elementos que llegan al *Sum*, vemos que hay un *Product*. Por un lado, tenemos la *z-K* y por otro lado el icono de *Repeating Sequence*. Es decir, de la multiplicación se obtiene **-K·z**.

El *Repeating Sequence*, permite crear una secuencia para programar el fallo del muelle. En este caso se ha decidido que el fallo sea de $\pm 20\%$. Primero se crea unos parámetros de tiempo, en este caso de 0 a 10 segundo. Seguidamente se añaden las perturbaciones.

Siendo 1: caso saludable, 0.8: fallo 1 (-20%), 1.2: fallo 2 (+20%), forzamos al programa que tras 4 segundos de secuencia saludable tenga 3 fallos por defecto y 3 más por exceso.

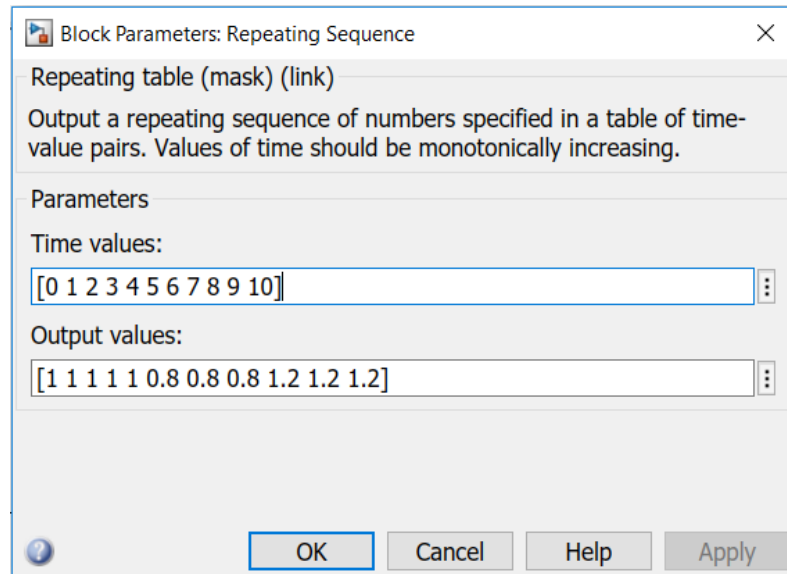


Figura 3-97 Repeating Sequence (Fuente: Fotografía propia)

Llegados a este punto, ya podemos completar el *Sum* y obtener la ecuación:

$$F u - K \cdot z + \Delta(t) - c \cdot \dot{z}$$

Ecuación 10

Esta fórmula es muy parecida a la Ec.9 Excepto porque nos falta dividirla por la masa mediante el icono *Divide* de este modo se obtiene \ddot{z} , cerrando así el sistema.

El icono *Divide* funciona de la siguiente manera:

$$\begin{matrix} A \rightarrow [\times] \\ B \rightarrow [\div] \end{matrix} \rightarrow \frac{A}{B}$$

Finalmente, se observa que el parámetro de salida del Modelo Válvula Dinámico es “z”.

3.4.1.7. Scope

Finalmente, mediante la operación Multiplexor, que permite juntar la señal (s) y el ruido (z), se ha obtenido la respuesta dinámica de la válvula.

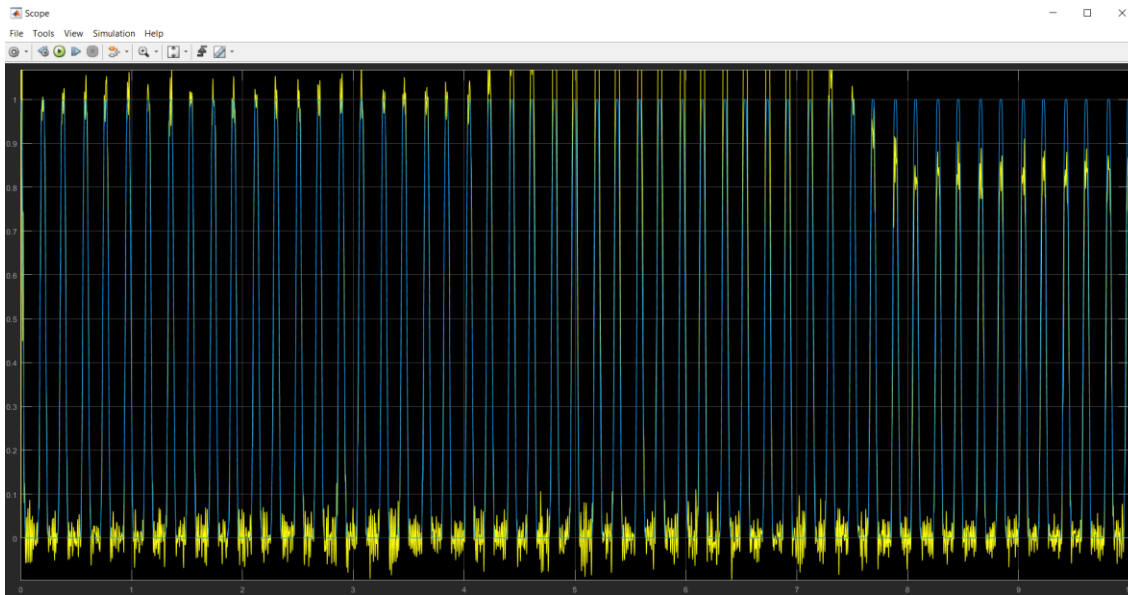


Figura 3-98 Scope (Fuente: Fotografía propia)

Si se amplía una zona de la parte superior del gráfico obtenido, podemos ver como las señales amarillas representan la señal con ruido y fallos, es decir, la “z”. En cambio, las señales azules representan la “s” inicial. Se recuerda que las gráficas muestran el desplazamiento lineal (mm) simulado por el *Perfil Leva* respecto del tiempo (s).

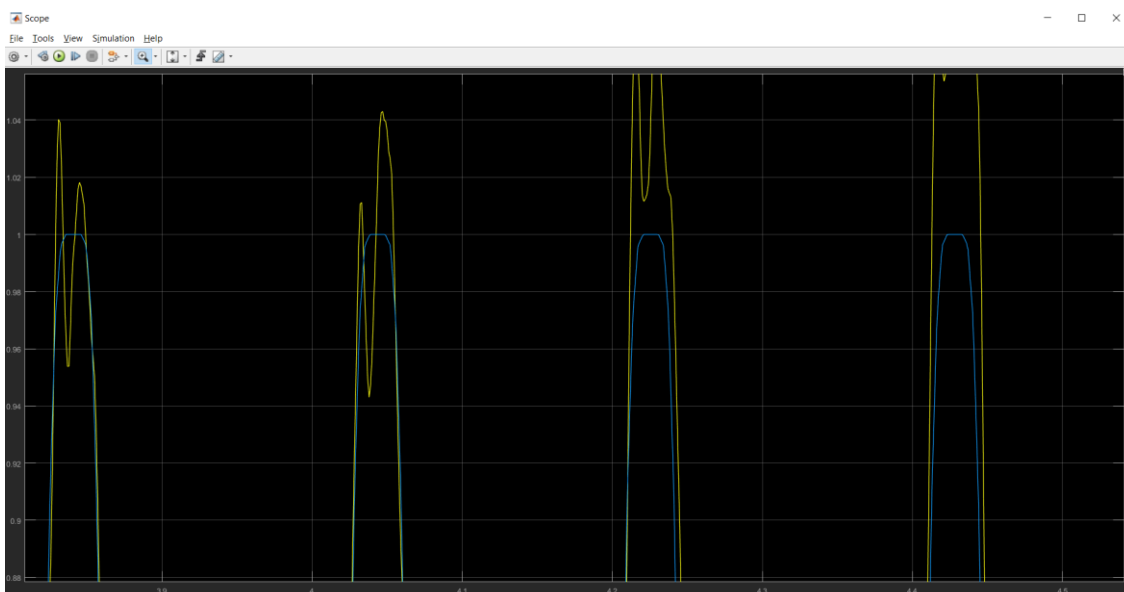


Figura 3-99 Zoom Scope (Fuente: Fotografía propia)

3.4.1.7.1 Medidor o Estimador K

El objetivo de este medidor es entrar dos señales que en la maqueta real provendrían de un sensor de posición y otro de fuerza para obtener una estima de la constante de rigidez (K) del muelle.

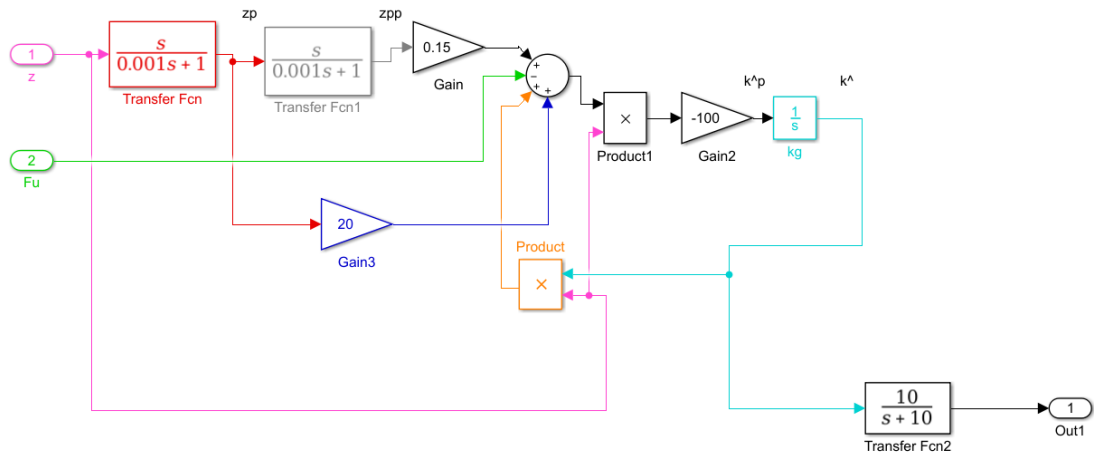


Figura 3-100 Modelo o Estimador K (Fuente: Fotografía propia)

En este caso la ecuación de la cual se parte es la siguiente:

$$\dot{\hat{K}} = -100 \cdot z \cdot [0,15 \cdot \ddot{z} - Fu + c \cdot \dot{z} + \hat{K} \cdot z]$$

Ecuación 11

Para entender el circuito hay que localizar al parámetro $\dot{\hat{K}}$, ubicado en antes del icono de la integral “1/s”.

El icono funciona de la siguiente manera:

$$\dot{\hat{K}} \rightarrow \left[\frac{1}{s} \right] \rightarrow K$$

Al aplicar el integrador se obtiene \hat{K} , la constante de estimación del muelle.

Si se sigue el recorrido y se usa el desvío hasta el *Product*, se obtiene en el *Sum*: $+\hat{K} \cdot z$.

Teniendo en cuenta que el icono " $\frac{s}{0.001s+1}$ " es la Transformada de Laplace, es decir hace de filtro para los ruidos de alta frecuencia (ya que no nos interesa amplificar el ruido) y a la vez su función es derivar, llegamos al *Sum* con el parámetro: **+0,15 · \ddot{z}**

Siguiendo en la línea superior, podemos ver que hay una bifurcación entre la primera Transformada de Laplace y la segunda. Si seguimos la ruta hasta el *Sum*, se obtiene el parámetro: **+ c · \dot{z}**

Si se observa la segunda variable de entrada, la de *Fu*, y se sigue hasta el *Sum*, se obtiene: **- Fu.**

Llegados a este punto, ya podemos completar el *Sum* y obtener la ecuación:

$$[0,15 \cdot \ddot{z} - Fu + c \cdot \dot{z} + \hat{K} \cdot z]$$

Ecuación 12

Esta fórmula es muy parecida a la Ec.11. Excepto porqué nos falta multiplicarla $-100 \cdot z$, de este modo se obtiene $\dot{\hat{K}}$, mediante el icono *Product*, cerrando así el sistema.

Finalmente, se observa un último icono antes de llegar a la salida del Modelo o Estimador, el " $\frac{s}{s+10}$ ". Este es solamente un filtro para eliminar el ruido de paso bajo. Se puede observar que la variable de salida del sistema es la " \hat{K} ".

3.4.1.7.2 Scope1

Finalmente se llega al *Scope1* que representa el Estimador (\hat{K}) del muelle objeto, de estudio. En la Figura 3-101 se puede ver el comportamiento tal como se programó en el apartado anterior de *Repeating Sequence*.

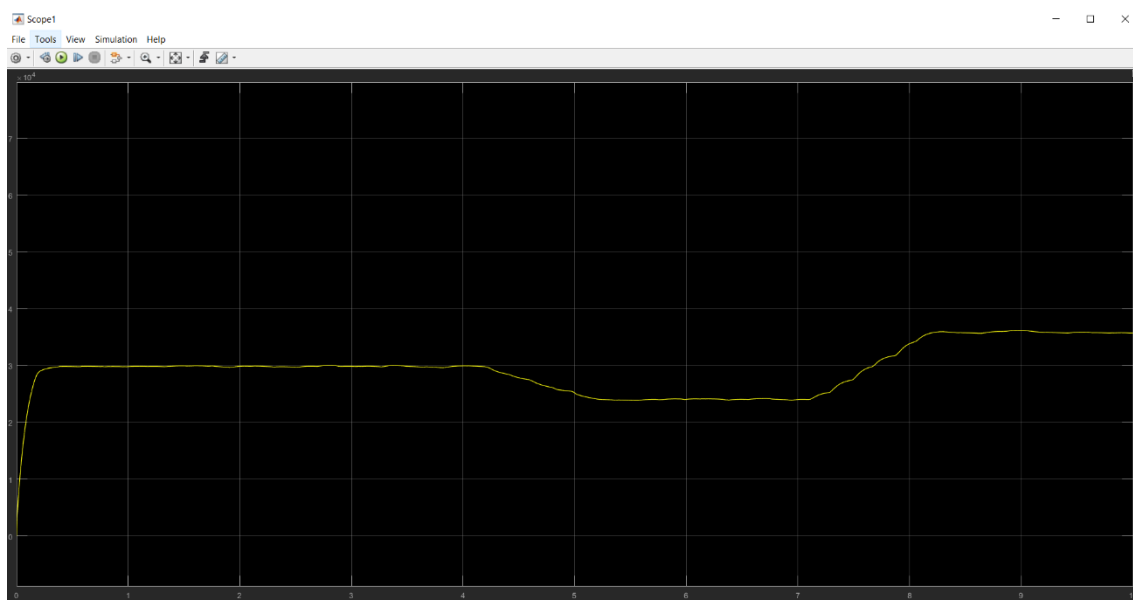


Figura 3-101 Scope (Fuente: Fotografía propia)

3.4.2. Aplicación del Diseño del Modelo Matemático del caso simulado por *Motion*

Mediante los resultados que se han obtenido en el capítulo anterior 3.4.1, se ha procedido a aplicar el diseño del modelo matemático del apartado 3.4.2.

Respecto del caso anterior, se ha añadido un *Gain* de 0.1 para pasar a metros los valores de las señales procesadas en apartados anteriores pues estamos trabajando en sistema MKS en el *Simulink*. También se han ajustado un par de parámetros: tiempo de ensayo, escala del gráfico y parámetros de los integradores para obtener un resultado con la mayor resolución posible.

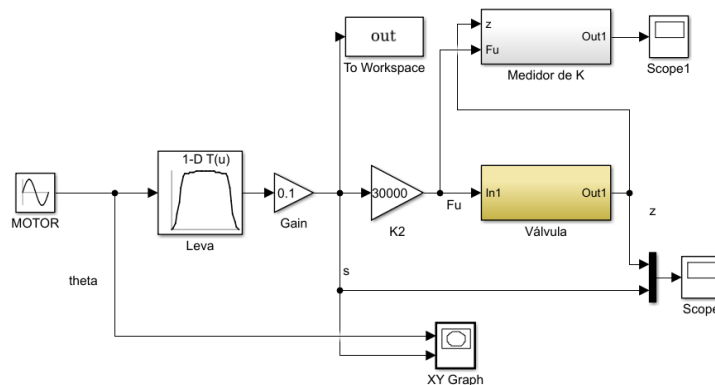


Figura 3-102 Esquema del Diseño del Modelo Matemático Real (Fuente: Fotografía propia)

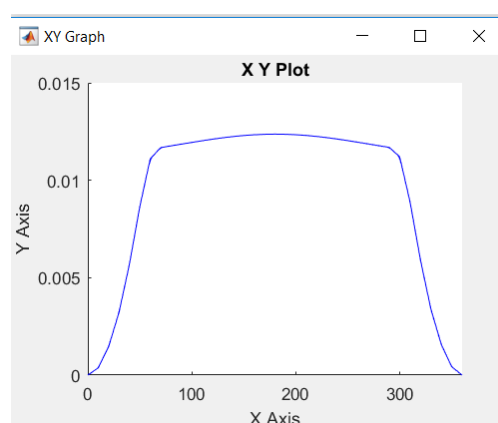


Figura 3-103 XY Graph del Modelo Real (Fuente: Fotografía propia)

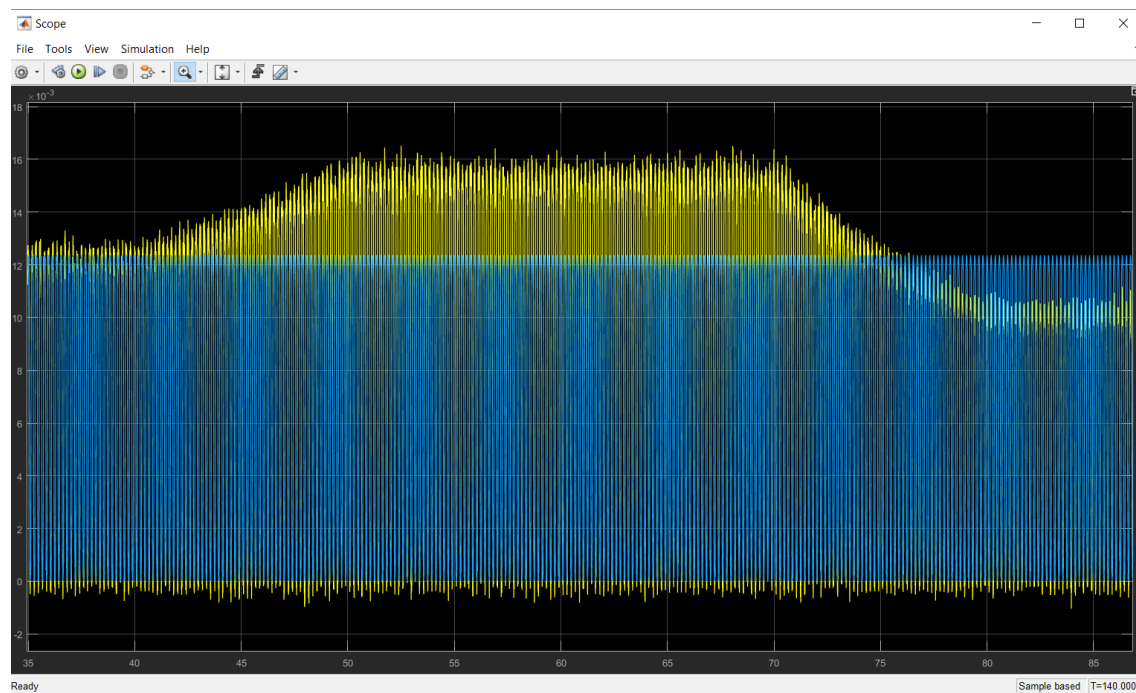


Figura 3-104 Scope Real (Fuente: Fotografía propia)

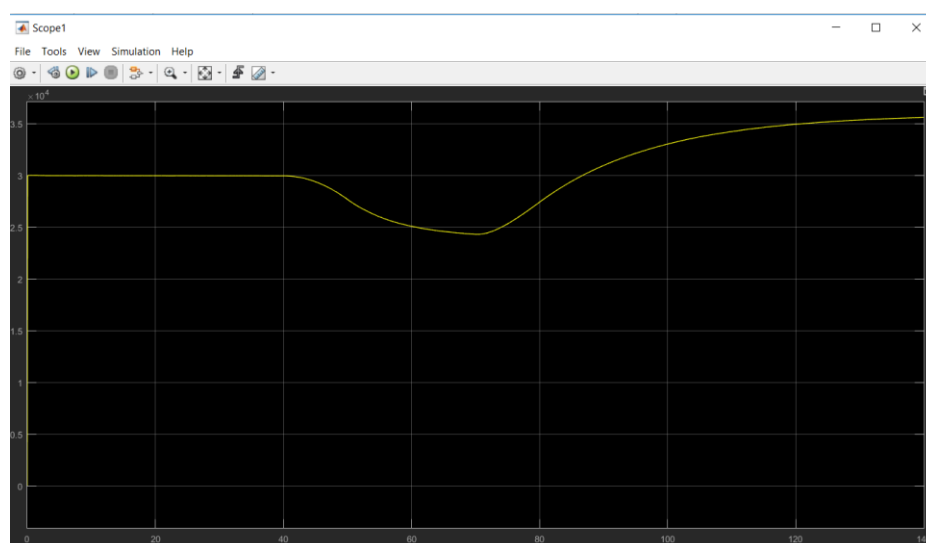


Figura 3-105 Scope1 Real (Fuente: Fotografía propia)

Análisis del Impacto Ambiental

Tras discutir el tema con el director del proyecto, se ha llegado a la conclusión de que, en este TFG, al tratarse de un prototipo este apartado no se aplica: no es contaminante, no es toxico, no es corrosivo, no emite residuos.

A<<<

Conclusiones

La realización del proyecto me ha demostrado que un ingeniero no puede quedarse parado cuando aparecen dificultades, en este caso cuando no se vio claro realizar la maqueta y se decidió realizar los ensayos virtualmente.

Esto implicó aprender el funcionamiento de dos herramientas informáticas que nunca antes había usado: el “Análisis de Movimiento” del complemento *Motion* del *SolidWorks* y el *Simulink* del *MATLAB*.

Aprovechando que se tenía acceso a la Escuela, contamos con la opinión de profesores de distintos departamentos que fueron claves para el desarrollo del proyecto. Los más significativos fueron la opinión de Jesús Maria Petreñas Ranedo, del Departamento de Mecánica, sobre la frecuencia natural del muelle y el de Sergio Gómez González, profesor de la asignatura *Ampliación de Empresión Gráfica (AEGE)* quien me permitió asistir de oyente a una de sus clases de *SolidWorks*.

Otro aspecto que se ha intentado reflejar varias veces a lo largo del trabajo es que muchos estudiantes empezamos la carrera con la ilusión de diseñar máquinas, pero la Escuela te enseña que lo más importante es hacer un estudio previo en el mercado y ver si te sale a cuenta o no. El ejemplo más claro es el hecho de comprar elementos normalizados e implementarlos en el proyecto.

Referente a los resultados nos hubiera gustado extraerlos de una maqueta real, de hecho, no se descarta realizarla en un futuro, entre otras cosas porque existe la motivación de elaborar un “*Paper*” para una revista científica. Aún así, consideramos que los resultados obtenidos cumplen con el objetivo principal del TFG.

Como objetivos específicos se quería realizar ensayos con distintas poleas y muelles, pero al elaborar un Modelo Simple el objetivo cambió. La prioridad era diseñar un modelo matemático del desgaste del muelle que fuera funcional a partir de los resultados obtenidos por simulación del *Motion*. Por ello se decidió estudiar un único caso: la Válvula de Admisión cuando la relación de transmisión de la correa es de $i=3$.

Uno de los aspectos que más benefician el trabajo es que no solamente se ha limitado diseñar una maqueta funcional, sino que se ha querido ir un paso más allá primero al querer usar sensores y luego elaborando un modelo matemático. En la actualidad las Oficinas Técnicas de las empresas cuentan con ingenieros de todo tipo que han de trabajar conjuntamente y este proyecto es un ejemplo de ello.

Finalmente, al observar los resultados gráficos obtenidos con el Simulink, se observa que se ha obtenido un modelo matemático explicativo de la fatiga en el muelle, es decir que, a pesar de las dificultades a lo largo del proyecto, se ha logrado con éxito satisfacer el objetivo principal del

Presupuesto

Para la elaboración del presupuesto se ha decidido poner los precios de los elementos a fabricar o comprar, pero también de los que se tienen. Con ello se pretende dar una idea del coste de la maqueta por si en un futuro se hace una continuidad del experimento.

PRESUPUESTO TOTAL: 6.509,03 €

- **Coste del Material: 1.709,03 €**

Tabla 13 Presupuesto

CÓDIGO	DESCRIPCIÓN	PROVEEDOR	UDS	REFERENCIA PROVEEDOR	PRECIO UNITARIO €	PRECIO SUBTOTAL
001	BANCADA	COASOL / TALLERES NASAMIC, S.L. /TÉCNICOS LABORATORIO EEBE	1	Pieza de diseño propio	500	500,00 €
002	VÁSTAGO VÁLVULA ADMISIÓN	TRW	1	2620	15,03	15,03 €
003	VÁSTAGO VÁLVULA ESCAPE	FRECCIA	1	R4188/RCR	10,95	10,95 €
004	MUELLE	MONROE	2	SP3451	38,95	77,90 €
005	TUERCA VÁLVULA M10	HOLT	2	DIN 934 - M6x10mm	1,52	3,04 €
006	RETENEDOR DE MUELLE DE VÁLVULA	EBAY	2	301919441589	40	80,00 €
007	TAPÓN VÁLVULA	MILANUNCIOS	2	108518796	12	24,00 €
008	BALANCÍN	FEBI BILSTEIN	2	7919	23,52	47,04 €
009	EJE DEL BALANCÍN	FEBI BILSTEIN	1	7561	30,25	30,25 €
010	SUJECCIÓN BALANCÍN-EJE	FEBI BILSTEIN	1	8615	17,79	17,79 €
011	SOPORTE BALANCÍN	MILANUNCIOS	1	218232028	75	75,00 €
012	ÁRBOL DE LEVAS	FEBI BILSTEIN	1	5444	242,49	242,49 €

013	SOPORTE ÁRBOL DE LEVAS	COASOL / TALLERES NASAMIC, S.L. /TÉCNICOS LABORATORIO EEBE	3	Pieza de diseño propio	50	150,00 €
014	Parte trasera MOTOR	FIYO	1	10027616	149,99	149,99 €
015	Parte delantera MOTOR	FIYO	1	10027616	0	0,00 €
016	Parte central MOTOR	FIYO	1	10027616	0	0,00 €
017	Bobina y Eje MOTOR	FIYO	1	10027616	0	0,00 €
018	Polea MOTOR	FIYO	1	10027616	0	0,00 €
019	Tapa MOTOR	FIYO	1	10027616	0	0,00 €
020	Soporte regleta MOTOR	FIYO	1	10027616	0	0,00 €
021	Regleta MOTOR	FIYO	1	10027616	0	0,00 €
022	Soporte L MOTOR	METALGAMA, S.I.	2	Pieza de diseño propio	25	50,00 €
023	Tuerca anclaje soporte L MOTOR	ENTABAN	4	DIN 6927 / M5x6,5mm	0,22	0,88 €
024	Tuerca anclaje soportes ÁRBOL DE LEVAS	AKI	6	ISO-10511 / M6x4mm	1,95	11,70 €
025	Tornillo fijación soporte L trasero con MOTOR	HISPANOX	2	DIN 7984 / M3x12mm	1	2,00 €
026	Tornillo fijación soporte L delantero con MOTOR	HISPANOX	2	DIN 7984 / M3x30mm	2,2	4,40 €
027	Tuerca anclaje soporte L con MOTOR	AKI	4	ISO-10511 / M3x4mm	2,25	9,00 €
028	Tornillo sujeción Balancín	MECATECHNIC	1	DIN 609 / M8x75mm	8,46	8,46 €
029	CORREA	OPTIBELT	1	DIN 2215/ISO	8,6	8,60 €

	TRAPEZOIDAL			4184 - Perfil 5*		
030	Tronillo interno MOTOR	FIYO	2	10027616	0	0,00 €
031	Arandela MOTOR	FIYO	2	10027616	0	0,00 €
032	POLEA NORMALIZADA (i=3)	ROMAN HNOS, S.C.	1	RSRA17-102-K0-AH01	84,63	84,63 €
033	COJINETES / CASQUILLOS	IGUS, S.L.	3	GSM-2021-095	1,96	5,88 €
34	GUÍAS VALVULAS ADMISION Y ESCAPE	EBAY	2	291729312907	50	100,00 €

- **Honorarios:** 4.800€

Teniendo en cuenta que el TFG es de 24 créditos y un crédito equivale a 6 horas. Suponiendo aplicamos el precio recomendado por la Escuela para los convenios de prácticas, es decir: 8€/h, entonces:

$$24 \text{ créditos} \times \frac{6 \text{ horas}}{1 \text{ crédito}} \times \frac{8\text{€}}{1 \text{ h}} = 4.800 \text{ €}$$

Bibliografia

Disposiciones Legales y Normas Aplicadas

- Normativa de la UPC para la redacción del TFG.
- Normas de acotación: UNE-1-039-94 y ISO-129-1985

Libros

- Lefteri, C. C. L. (2008). *Así se hace: técnicas de fabricación para diseño de producto* (No. Sirsi) i9788498012583).
- Mollenhauer, K., & Tschöke, H. (Eds.). (2010). *Handbook of diesel engines*. Springer Science & Business Media.
- Van, B. R., & Schäfer, F. (2004). *Internal combustion engine handbook: Basics, components, systems, and perspectives*. Warrendale, Pa: SAE International.
- Flórez, J. A. Á., Agramunt, I. C., & Farrús, S. F. (2002). *Máquinas térmicas motoras* (Vol. 1). Univ. Politèc. de Catalunya.
- SolidWorks Motion, R. (2013). Dassault Systèmes SolidWorks Corporation. Waltham, USA.
- Sergio, G. G. (2008). El gran libro de SolidWorks. *MARCOMBO ediciones técnicas*. Barcelona, España.
- Nápoles Alberro, A., Gracia, P., & de la Vega, M. (2007). Análisis de mecanismos cinemática y dinámica. Ediciones *DELTA (2010: Barcelona)*.
- de Abajo, F. J. R., & Bengoa, V. Á. (2002). *Dibujo técnico*. Editorial Donostiarra.
- Rayo, A. E. (2006). *Interpretación de planos*. FC editorial.
-

Artículos

- G.M. Szymanski, F. Tomaszewski, "Diagnosis of automatic compensators of valve clearance in combustion engine with the use of vibration signals," *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 68-69, 479-490, 2016.
- Y. Wang, T. Megli, M. Haghighi, K.S. Peterson, A.G. Stefanopoulou, "Modelling and control of Electromechanical valve motor," Technical Report SAE 2002-01-1106 from the Society of Automotive Engineers, Inc, 2002.

Páginas Web:

- http://www.imem.unavarra.es/EMyV/pdfdoc/vib/vib_control.pdf (Comprobado el 10/1/2018)
- <http://teleformacion.edu.aytolacoruna.es/FISICA/document/fisicaInteractiva/mas/muelle/DETcteMEST1.htm> (Comprobado el 10/1/2018)
- <http://ocw.uc3m.es/ingenieria-mecanica/machine-theory/lectures-1/cams-design-ii> (Comprobado el 10/1/2018)
- [Http://psicodelicia7.files.wordpress.com](http://psicodelicia7.files.wordpress.com) (Comprobado el 10/1/2018)
- [Http://automotoryventas.com](http://automotoryventas.com) (Comprobado el 10/1/2018)
- [Http://aficionadosalamecanica.net](http://aficionadosalamecanica.net) (Comprobado el 10/1/2018)
- [Http://mecanicaymotores.com](http://mecanicaymotores.com) (Comprobado el 10/1/2018)
- [Http://ro-des.com](http://ro-des.com) (Comprobado el 10/1/2018)
- [Http://interempresas.net](http://interempresas.net) (Comprobado el 10/1/2018)
- [Http://gasgas.com](http://gasgas.com) (Comprobado el 10/1/2018)
- <http://mecanicaymotores.com> (Comprobado el 10/1/2018)
- <https://www.youtube.com/watch?v=8yZOUbmkgE> solidworks motion study tutorial | Cam and Follower (Comprobado el 10/1/2018)

Herramientas Informáticas:

- Office: Word, Excel, PowerPoint
- SolidWorks
 - o Motion
- MATLAB
 - o Simulink
- Navision (NAV)

